



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE  
CARRETERAS: UNA VISIÓN CRÍTICA  
(Volumen I. MEMORIA)**

Trabajo realizado por:

**Maria Herrero Ribó**

Dirigido por:

**José Rodrigo Miró Recasens**

Máster en:

**Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos**

Barcelona, 11 de junio de 2019

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

---

*A mi familia, por estar una vez más a mi lado.*

---

## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mi tutor, el Prof. Rodrigo Miró, el darme la oportunidad de poder trabajar en este proyecto y, para ello, prestarme su ayuda y total dedicación.

A la Prof. Violeta Vargas, por servirme de orientación durante los pasos iniciales del trabajo y, finalmente, a Sergio Carrascón, Director del Área Noreste y Canarias del IECA, por facilitarme una de las herramientas bases de la presente tesina.

---

## RESUMEN

**Título:** Análisis de ciclo de vida de carreteras: una visión crítica.

**Autora:** Herrero Ribó, Maria

**Tutor:** Miró Recasens, José Rodrigo

**Palabras clave:** Análisis del Ciclo de Vida (ACV), Análisis del Ciclo de Vida de Firms (ACVF), impacto ambiental, mezcla bituminosa, hormigón.

Las etapas de la vida útil de una sección de firme van desde la extracción de las materias primas, la fabricación, la construcción y puesta en obra, pasando por las operaciones de mantenimiento y conservación, para llegar hasta el fin de vida, con su reciclado o retirada a vertedero. Todo este proceso lleva asociado un gran consumo de los recursos disponibles, así como la generación de una gran cantidad de emisiones, vertidos y residuos. Por este motivo, recientemente, nace un especial interés en la búsqueda de metodologías que permitan una mejor gestión de las tecnologías y materiales disponibles, creando soluciones que sean mucho más sostenibles y reduciendo los impactos generados.

La herramienta de evaluación ambiental del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), especialmente el Análisis del Ciclo de Vida de Firms (ACVF), permite conocer cuáles son estos impactos medioambientales, clasificándolos en diferentes categorías.

Hasta el momento, existen numerosos estudios en materia de ACVF, tanto a nivel internacional como nacional, aunque su alcance y conclusiones obtenidas pueden diferir bastante. En esta misma línea, se encuentran disponibles en el mercado varias herramientas para la realización del ACV. En la presente tesina, se recogen las principales investigaciones efectuadas y se realiza un análisis de 6 herramientas informáticas para los cálculos de un ACVF. De la evaluación, se escogen la Herramienta del Gobierno de Aragón y la Herramienta de Evaluación del ACVF y CCVF de las secciones de Firme, creada por el IECA, para el análisis de las secciones 131, 132 y 134, definidas por la Norma 6.1-IC.

En particular, se comparan los impactos generados en la producción de una tonelada de mezcla bituminosa frente a una de hormigón. Se analiza qué etapa del ciclo de vida lleva asociados mayores impactos y, finalmente, se determina cuál de las tres secciones es más sostenible. Para el caso de la herramienta del IECA, se complementa el análisis ambiental con uno de tipo económico (CCVF).

Atendiendo a los resultados obtenidos, ambas herramientas presentan resultados parecidos, a pesar de existir ciertas diferencias. Las mezclas bituminosas, en la mayoría de categorías de impacto estudiadas, suponen una mejor alternativa que el hormigón, excepto cuando se evalúa el Agotamiento de los Recursos Fósiles. En la comparación de las dos secciones con firmes bituminosos, 131 y 132, la primera obtiene mejores resultados con la Herramienta del Gobierno de Aragón, mientras que en el otro caso, es a la inversa. En la comparación con todas las secciones, la de tipo rígido (134) es la alternativa que más compromete al entorno. Por el contrario, en el CCVF es la opción más viable económicamente. Finalmente, comparando las etapas de construcción y mantenimiento, se observa que los resultados varían mucho en función de las operaciones definidas, aunque para el presente caso, la etapa de construcción lleva asociados unos costes ambientales mayores. Por lo tanto, se pone de manifiesto que los resultados obtenidos en todo ACV llevan asociado un grado de subjetividad elevado, pudiendo variar mucho entre sí.



---

## ABSTRACT

**Title:** Road's life cycle analysis: a critical vision.

**Author:** Herrero Ribó, Maria

**Tutor:** Miró Recasens, José Rodrigo

**Keywords:** Life Cycle Analysis (LCA), Road Pavement Life Cycle Analysis, environmental impact, bituminous mixture, concrete.

The Life Cycle stages of road pavements go from the extraction of the raw materials, the manufacture, the construction, going through the maintenance and conservation operations, until the end of life, with its recycling or landfill deposition. All this processes are associated with a large consumption of available resources, as well as the generation of emissions, discharges and wastes. For this reason, recently, a special interest arises in the search of methodologies that allow a better management of the available technologies and materials, creating solutions that are much more sustainable and reducing the amount of impacts generated.

The Life Cycle Analysis (LCA), especially the Road Pavement Life Cycle Analysis, allows to know what these environmental impacts are, classifying them in different categories.

Until now, there are numerous studies related with LCA and road pavements, both internationally and nationally, although their scope and conclusions may differ a lot. In the same line, several tools for the realization of the LCA are available in the market. In the present paper, the main methodologies carried out are collected and an analysis of 6 IT tools for the calculations of LCA is done. From the evaluation, the "*Herramienta del Gobierno de Aragón*" and the "*Herramienta de Evaluación del ACVF y CCVF de las secciones de Firme*" created by the IECA, are chosen for the analysis of sections 131, 132 and 134, defined by the Standard "*Norma 6.1-IC*".

Particularly, the impacts generated in the production of one tonne of bituminous mix are compared to one tonne of concrete. It is analysed which stage of the life cycle has greater associated impacts and, finally, it is determined which of the three sections is more sustainable. For the case of the IECA tool, the environmental analysis is complemented by an economic analysis (CCVF).

Attending to the obtained results, both tools present similar results, in spite of existing certain differences. Bituminous mixtures, in most of the impact categories studied, represent a better alternative than concrete, except when evaluating the Depletion of Fossil Resources. In the comparison of the two sections with bituminous pavements, 131 and 132, the first one obtains better results with the Government of Aragon's tool, while in the other case, it is the other way round. In the comparison with all the sections, the rigid one (134) is the alternative that most compromises the environment. On the contrary, in the CCVF it is the most economically viable option. Finally, comparing the stages of construction and maintenance, it is observed that the results vary greatly depending on the operations defined, although for the present case, the construction stage has associated higher environmental costs. Therefore, it is clear that the results obtained in all LCA have a high degree of subjectivity associated, which can make them vary a lot depending on the case.

## ÍNDICE

## Volumen I. MEMORIA

<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>i</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>iii</b>
<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos .....	2
<b>Capítulo 2. EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA .....</b>	<b>4</b>
2.1. Historia del ACV .....	4
2.2. El ACV en España.....	5
2.3. Definición y objetivo .....	7
2.4. Normativas.....	8
2.5. Etapas del ACV .....	9
2.5.1. Definición del objetivo, alcance y límites del sistema .....	10
2.5.2. Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) .....	12
2.5.3. Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) .....	13
2.5.4. Interpretación de los resultados .....	16
2.6. Categorías de impacto .....	16
2.7. Beneficios del ACV .....	19
2.8. Limitaciones del ACV.....	20
2.9. Análisis de Costes del Ciclo de Vida (CCV) .....	21
<b>Capítulo 3. EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN FIRME (ACVF) .....</b>	<b>23</b>
3.1. Introducción y objetivo del ACVF.....	23
3.2. Unidad funcional .....	25
3.3. Etapas del ACVF .....	26
3.3.1. Definición del objetivo, alcance y límites del sistema .....	26
3.3.2. Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV) .....	27
3.3.3. Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) .....	31
3.3.4. Interpretación de los resultados .....	31
3.4. Limitaciones del ACVF.....	31
<b>Capítulo 4. METODOLOGÍAS DE ACVF .....</b>	<b>33</b>
4.1. Principales metodologías europeas.....	33
4.1.1. ECRPD .....	33
4.1.2. LCE4ROADS .....	37
4.1.3. Re-Road .....	40

4.2.	Principales metodologías españolas.....	43
4.2.1.	AVACo y LCA-Abacus.....	43
4.2.2.	Proyecto Fénix.....	46
4.2.3.	Tesis de Ángel Sampedro.....	53
4.2.4.	Tesis de Alberto Moral.....	55
4.2.5.	Proyecto LIFESURE.....	56
4.3.	Comparativa entre las metodologías analizadas.....	60
4.4.	Otras metodologías de interés.....	62
<b>Capítulo 5. HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS DE ACVF .....</b>		<b>64</b>
5.1	Tipos de herramientas de ACVF.....	64
5.1.1.	Según el enfoque.....	64
5.1.2.	Según el tipo de estudio.....	65
5.1.3.	Según el ámbito geográfico.....	66
5.1.4.	Según el tipo de acceso.....	66
5.1.5.	Otras características.....	66
5.2	Análisis de las herramientas seleccionadas.....	67
5.2.1.	Consideraciones previas.....	67
5.2.2.	GaBi.....	67
5.2.3.	Evaluación del ACVF y CCVF de las secciones de firme (IECA).....	73
5.2.4.	Herramienta de evaluación ambiental del Gobierno de Aragón.....	81
5.2.5.	HueCO <sub>2</sub> .....	89
5.2.6.	Eurobitume.....	95
5.2.7.	ECCO <sub>2</sub> .....	98
5.3	Selección final para el ejemplo práctico.....	105
<b>Capítulo 6. CASO PRÁCTICO 1 – HERRAMIENTA GOBIERNO DE ARAGÓN .....</b>		<b>108</b>
6.1.	Definición del objetivo, alcance y límites del sistema.....	108
6.2.	Análisis de Inventario del Ciclo de Vida.....	109
6.2.1.	Fase de producción de los materiales y construcción.....	110
6.2.2.	Fase de mantenimiento y rehabilitación.....	118
6.3.	Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida.....	120
6.4.	Interpretación de los resultados.....	120
6.4.1.	Comparación entre firmes flexibles y rígidos.....	121
6.4.2.	Comparación entre las secciones flexibles (S131 y S132).....	123
6.4.3.	Comparación de todas las secciones analizadas.....	124
6.4.4.	Comparación de las operaciones de mantenimiento.....	125
<b>Capítulo 7. CASO PRÁCTICO 2 – HERRAMIENTA IECA.....</b>		<b>129</b>
7.1.	Definición del objetivo, alcance y límites del sistema.....	129
7.2.	Análisis de Inventario del Ciclo de Vida.....	130
7.2.1.	Datos generales de la sección.....	130
7.2.2.	Datos de mantenimiento - conservación.....	134
7.3.	Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida.....	135
7.4.	Interpretación de los resultados.....	136

7.4.1. Comparación entre firmes flexibles y rígidos .....	136
7.4.2. Comparación entre las secciones flexibles (S131 y S132) .....	138
7.4.3. Comparación de todas las secciones analizadas.....	141
7.4.4. Comparación de las operaciones de mantenimiento .....	144
7.4.5. Resultados del análisis de costes (CCV) .....	147
<b>Capítulo 8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>151</b>
 <b>REFERENCIAS.....</b>	 <b>154</b>
Referencias bibliográficas .....	154
Normativa consultada.....	156
Otra bibliografía consultada .....	156

## **Volumen II. ANEJOS**

<b>Anejo 1. Caso práctico 1 – Inventario y resultados .....</b>	<b>I</b>
<b>Anejo 2. Caso práctico 2 – Inventario y resultados .....</b>	<b>XIX</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Principales categorías de impacto ambiental, (SETAC).....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2. Metodologías de ACVF y su horizonte temporal.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 3. Etapas del CV analizadas en cada metodología .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 4. Módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga, (Norma 6.1-IC).....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 5. Ejemplos de la BBDD de HueCO<sub>2</sub>, (Hoja Excel HueCO<sub>2</sub>).....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 6. Sistema de puntuación del grado de incertidumbre, (Guía de HueCO<sub>2</sub>) .....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 7. Inventario simplificado para 1 tn de mezcla bituminosa, (HueCO<sub>2</sub>) .....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 8. Resultados numéricos de la HC, (HueCO<sub>2</sub>) .....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 9. Etapas del CV analizadas en cada herramienta .....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 10. Resultados de la fabricación y construcción de 1 tn de mezcla bituminosa, (Herramienta Gob. Aragón) .....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 11. Resultados de la fabricación y construcción de 1 m<sup>3</sup> de hormigón, (Herramienta Gob. Aragón) .....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 12. Comparación entre la fabricación de 1 tn de MB y hormigón, (Herramienta Gob. Aragón) .....</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 13. Comparación entre la fabricación de 1 m<sup>3</sup> de ZA y SC, (Herramienta Gob. Aragón) .....</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 14. Comparación entre las secciones S131 y S132, (Herramienta Gob. Aragón).....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 15. Comparación entre las secciones S131, S132 y S134, (Herramienta Gob. Aragón) .....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 16. Comparación relativa entre las secciones S131, S132 y S134, (Herramienta Gob. Aragón) .....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 17. Operaciones de mantenimiento superficial y estructural, (Herramienta Gob. Aragón) .....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 18. Resultados etapas CV S131, (Herramienta Gob. Aragón).....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 19. Resultados etapas CV S132, (Herramienta Gob. Aragón).....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 20. Resultados etapas CV S134, (Herramienta Gob. Aragón).....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 21. Resultados de la fabricación y construcción de 1 tn de mezcla bituminosa, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 22. Resultados de la fabricación y construcción de 1 tn de hormigón, (Herramienta IECA).....</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 23. Resultados de la fabricación y construcción de 1 m<sup>3</sup> de ZA y SC, (Herramienta IECA).....</i>	<i>140</i>
<i>Tabla 24. Resultados de la fabricación y construcción de las S131 y S132, (Herramienta IECA).....</i>	<i>140</i>
<i>Tabla 25. RTI Resultados de la fabricación y construcción de la S134, (Herramienta IECA).....</i>	<i>142</i>

<i>Tabla 26. Resultados de la fabricación y construcción de las tres secciones, (Herramienta IECA).....</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 27. Operaciones de mantenimiento superficial y estructural, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 28. Resultados etapas CV S131, S132 y S134, (Herramienta IECA).....</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 29. Resultados costes asociados a la S131, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 30. Resultados costes asociados a la S132, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 31. Resultados costes asociados a la S134, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>148</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Evolución en el número de artículos de ACV, (Basañez et al., 2013)</i> .....	6
<i>Figura 2. Esquema general de un sistema de ACV</i> .....	7
<i>Figura 3. Etapas de un ACV, (Norma UNE-EN ISO 14040, 2006)</i> .....	10
<i>Figura 4. Alcance de un ACV según los límites</i> .....	11
<i>Figura 5. Etapas del inventario de un ACV</i> .....	14
<i>Figura 6. Perspectivas socio-culturales y su relación frente a la sumisión al grupo y a la normativa, (Cowell, 1998)</i> .....	15
<i>Figura 7. Relación entre efectos de impacto intermedios y finales, (Udo de Haes et al., 1999)</i> .....	18
<i>Figura 8. Ciclo de vida del producto, (PDCA Home)</i> .....	21
<i>Figura 9. Nº de publicaciones referenciadas en Sciencedirect vinculadas a los términos LCA y Asphalt, (Moral, A., 2016)</i> .....	23
<i>Figura 10. Nº de publicaciones referenciadas en Sciencedirect vinculadas a los términos LCA y Pavement, (Moral, A., 2016)</i> .....	24
<i>Figura 11. Tendencia en el aumento porcentual de publicaciones científicas en Sciencedirect, (Moral, A., 2016)</i> .....	24
<i>Figura 12. Etapas del inventario del ciclo de vida de un firme</i> .....	27
<i>Figura 13. Etapas del CV de un firme, (Harvey, J. et al., 2014)</i> .....	29
<i>Figura 14. Flujos del sistema en JouleSAVE, (ECRPD, 2010)</i> .....	34
<i>Figura 15. Inputs sobre el tráfico, (ECRPD, 2010)</i> .....	35
<i>Figura 16. Inputs sobre las capas del pavimento, (ECRPD, 2010)</i> .....	35
<i>Figura 17. Energía en las fases de construcción y operación, (ECRPD, 2010)</i> .....	36
<i>Figura 18. Concepto de la metodología LCE4ROADS, (Fernández, R. et al., 2016)</i> .....	38
<i>Figura 19. Representación de los resultados de las secciones de firme estudiadas en AVACo, (Paris, A. et al., 2006)</i> .....	45
<i>Figura 20. Comparativa del daño asociado a dos plantas asfálticas (Ecoindicador'99), (Felipo, J. et al., 2008)</i> .....	48
<i>Figura 21. Comparativa del impacto asociado al ciclo de vida de dos plantas asfálticas (Ecoindicador'99), (Felipo, J. et al., 2008)</i> .....	49
<i>Figura 22. Diagrama de flujo de la metodología propuesta, (Sampedro, A. et al., 2009)</i> .....	50
<i>Figura 23. Emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas asfálticas con 0% y 20% de RAP, (Sampedro, A. et al., 2009)</i> .....	51

<i>Figura 24. Emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas asfálticas con 0%, 20% y 70% de RAP, (Sampedro, A. et al., 2012).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 25. Emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas asfálticas con 0%, 20% y 50% de RAP, (Sampedro, A. et al., 2012).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 26. Caracterización del ecoasfalto, (Layman's Report, 2018).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 27. Secciones testadas en la pista de ensayo, (Layman's Report, 2018).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 28. Tramos de ensayo en la calle Méndez Álvaro, (Layman's Report, 2018).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 29. Impacto relativo de cada mezcla y etapa, (Layman's Report, 2018).....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 30. Reducción de emisiones en los ecoasfaltos para cada etapa, (Layman's Report, 2018)...</i>	<i>60</i>
<i>Figura 31. Introducción de flujos de entrada y salida, (GaBi).....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 32. Impactos asociados al betún, (GaBi).....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 33. Introducción de las cantidades de los flujos, (GaBi).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 34. Introducción del factor de escala, (GaBi).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 35. Conexión de los procesos del CV, (GaBi).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 36. Resultados numéricos agrupados en flujos, (GaBi).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 37. Resultados numéricos agrupados en cantidades, (GaBi).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 38. Resultados gráficos, (GaBi).....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 39. Ejemplo de la definición de la calzada y arcén exterior, (Hoja cálculo IECA).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 40. Ejemplo de la definición de las operaciones de mantenimiento, (Hoja cálculo IECA).....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 41. Cálculo de los impactos asociados al transporte por km, (Hoja cálculo IECA).....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 42. Resultados de las categorías de impacto por etapa del CV, (Hoja cálculo IECA).....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 43. Calentamiento global para cada etapa del CV, (Hoja cálculo IECA).....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 44. Costes totales, de calzada y arcenes por etapa del CV, (Hoja cálculo IECA).....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 45. Costes totales por etapa del CV, (Hoja cálculo IECA).....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 46. Costes asociados a la conservación del firme, (Hoja cálculo IECA).....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 47. Precio descompuesto 1 tn de MB en caliente, (Hoja cálculo IECA).....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 48. Introducción de datos explanada S-EST1, (Herramienta Gob. Aragón).....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 49. Alternativas para un mismo tipo de explanada S-EST1, (Herramienta Gob. Aragón).....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 50. Alternativas de explanada para suelo tolerable, (Herramienta Gob. Aragón).....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 51. Introducción de datos MBC capa de rodadura, (Herramienta Gob. Aragón).....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 52. Resultados numéricos de las alternativas estudiadas, (Herramienta Gob. Aragón).....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 53. Resultados gráficos de las alternativas estudiadas, (Herramienta Gob. Aragón).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 54. Categorías de HueCO<sub>2</sub>, (Guía de HueCO<sub>2</sub>).....</i>	<i>90</i>



<i>Figura 55. Rango de incertidumbre, (Guía de HueCO<sub>2</sub>)</i> .....	92
<i>Figura 56. Lista de elementos excluidos, (Guía de HueCO<sub>2</sub>)</i> .....	93
<i>Figura 57. Resultados gráficos de la HC, (HueCO<sub>2</sub>)</i> .....	94
<i>Figura 58. Límites del sistema en Eurobitume, (Eurobitume)</i> .....	95
<i>Figura 59. Ejemplo del ICV de Eurobitume, (Eurobitume)</i> .....	96
<i>Figura 60. Ventana de trabajo: Materias Primas, (ECCO<sub>2</sub>)</i> .....	100
<i>Figura 61. Ventana de trabajo: Fabricación, (ECCO<sub>2</sub>)</i> .....	101
<i>Figura 62. Ventana de trabajo: Puesta en obra, (ECCO<sub>2</sub>)</i> .....	102
<i>Figura 63. Ventana de trabajo: Cálculos, (ECCO<sub>2</sub>)</i> .....	103
<i>Figura 64. Ejemplo de presentación de los resultados en forma gráfica, (ECCO<sub>2</sub>)</i> .....	104
<i>Figura 65. Ejemplo de recopilación de datos utilizados en los cálculos, (ECCO<sub>2</sub>)</i> .....	104
<i>Figura 66. Tipo de suelo y categoría de tráfico, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	110
<i>Figura 67. Posibles secciones de explanada, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	110
<i>Figura 68. Inventario suelo seleccionado S4, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	111
<i>Figura 69. Inventario suelo estabilizado S-EST2, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	111
<i>Figura 70. Inventario suelo estabilizado S-EST3, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	112
<i>Figura 71. Inventario riego de curado, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	112
<i>Figura 72. Esquema de las secciones S131 y S132, (Moral, A., 2016)</i> .....	113
<i>Figura 73. Esquema de la sección S134</i> .....	113
<i>Figura 74. Inventario capa de rodadura, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	113
<i>Figura 75. Inventario capa intermedia, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	114
<i>Figura 76. Inventario capa base, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	114
<i>Figura 77. Inventario riego de adherencia, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	115
<i>Figura 78. Inventario riego de imprimación, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	115
<i>Figura 79. Inventario capa de zahorra, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	115
<i>Figura 80. Inventario capa de suelocemento, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	116
<i>Figura 81. Inventario capa de hormigón de firme, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	116
<i>Figura 82. Inventario capa de hormigón magro-vibrado, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	117
<i>Figura 83. Posibles secciones de explanada y firme, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	117
<i>Figura 84. Secciones de firme (T1 sobre E3), (Norma 6.1-IC)</i> .....	118
<i>Figura 85. Operaciones de mantenimiento y rehabilitación</i> .....	119
<i>Figura 86. Resultados relativos secciones S131, S132 y S134, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	125
<i>Figura 87. Resultados MPp y MPnp para todas las etapas del CV, (Herramienta Gob. Aragón)</i> .....	127

<i>Figura 88. Resultados DEA y ICC para todas las etapas del CV, (Herramienta Gob. Aragón).....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 89. Secciones de firme (T1 sobre E3), (Norma 6.1-IC).....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 90. Definición sección y período de estudio, (Herramienta IECA).....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 91. Dimensiones calzada, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 92. Materiales y espesores Sección 131, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 93. Materiales y espesores Sección 132, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 94. Materiales y espesores Sección 134, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 95. Dimensiones arcenes S131, (Herramienta IECA).....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 96. Dimensiones arcenes S132, (Herramienta IECA).....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 97. Dimensiones arcenes S134, (Herramienta IECA).....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 98. Inventario distancias de transporte materiales, (Herramienta IECA).....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 99. Inventario densidad, % betún y % filler, (Herramienta IECA).....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 100. Interés anual y tasa de inflación, (Herramienta IECA).....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 101. Operaciones de mantenimiento S131 y S132, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 102. Operaciones de mantenimiento S134, (Herramienta IECA).....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 103. Resultados Calentamiento Global y Agotamiento de la Capa de Ozono (etapa construcción), (Herramienta IECA).....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 104. Resultados Acidificación y Eutrofización (etapa construcción), (Herramienta IECA).....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 105. Resultados Oxidación Fotoquímica y Agotamiento Recursos Abióticos (etapa construcción), (Herramienta IECA) .....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 106. Resultados Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos y Toxicidad (etapa construcción), (Herramienta IECA) .....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 107. Resultados Calentamiento Global y Agotamiento de la Capa de Ozono para todas las etapas del CV, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 108. Resultados Acidificación y Eutrofización para todas las etapas del CV, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 109. Resultados Oxidación Fotoquímica y Agotamiento Recursos Abióticos para todas las etapas del CV, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 110. Resultados Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos y Toxicidad para todas las etapas del CV, (Herramienta IECA) .....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 111. Resultados costes totales S131, (Herramienta IECA).....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 112. Resultados costes totales S132, (Herramienta IECA).....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 113. Resultados costes totales S134, (Herramienta IECA).....</i>	<i>150</i>

## Capítulo 1

# INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. Introducción

Las infraestructuras del transporte son un elemento vertebrador fundamental del territorio, creando una conexión entre los distintos lugares de éste. Dentro de las diferentes tipologías existentes, destacan las infraestructuras terrestres, al ser la alternativa más utilizada para el transporte de mercancías y viajeros en distancias cortas.

A nivel europeo, el transporte por carretera resulta ser un medio eficaz, rápido y con más flexibilidad que el transporte ferroviario, marítimo u aéreo. Por este motivo, sólo en la Unión Europea, más del 40% de las mercancías es transportado por nuestras carreteras.

Pero no solo resulta importante el transporte de bienes materiales, puesto que la mayoría de ciudadanos también elige el vehículo privado como modo de desplazamiento. De hecho, según el informe anual de 2017 del Observatorio del Transporte y la Logística en España, publicado en marzo de 2018, sólo el transporte de viajeros en turismo representa más del 86% del transporte de viajeros por carretera (*observatoriotransporte.fomento.es, 2019*).

Para poder soportar todo este tráfico, España cuenta con una de las mejores y más extensas redes de carreteras a nivel mundial, superando la friolera cifra de 650.000 kilómetros. El alcance de este número ha sido posible gracias a las grandes inversiones realizadas por el Gobierno Central y la Comunidad Europea.

Sin embargo, la construcción de nuevas infraestructuras y el mantenimiento de las ya existentes, lleva asociado un gran impacto ambiental. Es por eso que, en los últimos años, se están desarrollando nuevos proyectos que intentan ser más sostenibles y respetuosos con nuestro entorno.

En relación al párrafo anterior, juega un papel muy importante el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), una herramienta de evaluación ambiental nacida en la década de los sesenta en los Estados Unidos. En particular, el Análisis del Ciclo de Vida de Firms (ACVF), cuya implementación como técnica de valoración de las infraestructuras viarias ha evolucionado notablemente en los últimos años. Y es que, además de muchas otras ventajas, el ACVF permite evaluar las afecciones ambientales de todas y cada una de las fases que componen la vida útil de una carretera. Es decir, contabiliza los recursos utilizados durante su ciclo de vida, además de las emisiones, vertidos y residuos generados. De este modo, permite escoger aquellas soluciones menos comprometedoras con el entorno.

El ACVF está siendo utilizado para conocer aquellos materiales o métodos de fabricación que resultan ser medioambientalmente mejores, especialmente a partir del debate creciente entre los firms contruidos con mezclas bituminosas y los de tipo rígido, contruidos con hormigones.

También, se están realizando numerosos estudios para evaluar los beneficios de trabajar con materiales reciclados. De lo comentado hasta el momento y mucho más, se habla con detalle en los próximos capítulos del presente trabajo.

## 1.2. Objetivos

El principal objetivo de este estudio es analizar las herramientas disponibles actualmente para la elaboración del Análisis del Ciclo de Vida de Carreteras, concretamente, de los firmes. Para ello, se recogen las principales investigaciones sobre ACVF realizadas hasta el momento, además de proporcionarse un compendio de algunas de las herramientas disponibles para su ejecución, pudiendo así terminar con la realización de un ejemplo práctico. Específicamente, los pasos que se siguen son los siguientes:

- Introducción a la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), describiendo en qué se basa, las etapas que la componen, cuáles son sus principales ventajas y limitaciones, así como la normativa disponible hasta el momento para su correcta ejecución.
- Siguiendo el mismo esquema que en el punto anterior, particularización para el caso del Análisis del Ciclo de Vida de Firmes (ACVF).
- Estudio de las principales metodologías de ACVF realizadas hasta día de hoy. Primero, análisis de los principales proyectos a nivel europeo, para después particularizar al ámbito español. A continuación, comparación de todos ellos.
- Evaluación de los principales tipos de herramientas disponibles en el mercado para la práctica del ACVF. Análisis exhaustivo de 6 de ellas, valoración de sus prestaciones y modo de trabajo. Selección de la/s herramienta/s que mejor se adapten a las necesidades del presente trabajo
- Elaboración de un caso práctico mediante el *software* seleccionado, con el objetivo de conocer el impacto ambiental asociado a las secciones fabricadas con pavimentos asfálticos y rígidos, concretamente las definidas por la Norma 6.1-IC como 131, 132 y 134. Evaluación de las etapas de extracción de los materiales, la construcción del firme y las estrategias de mantenimiento definidas para un horizonte temporal de 20 años.

Tras la ejecución de los puntos anteriores y la obtención de los resultados del caso práctico, se espera poder llegar a una serie de conclusiones. Éstas pueden resumirse en los puntos siguientes:

- Conocer el estado del trabajo realizado hasta el momento en materia de ACVF, dando énfasis a las principales conclusiones extraídas, herramientas y material disponible, así como las principales limitaciones encontradas.
- Establecer, para la fabricación de una tonelada de material, cuáles son aquellos materiales que llevan asociado un mayor impacto ambiental dentro de las categorías de impacto seleccionadas.
- Poder valorar cuál de las tres secciones analizadas representa un mayor riesgo para el entorno. Además, dentro de las secciones fabricadas con firmes bituminosos, descubrir

si resulta una mejor alternativa una sección que contenga zahorra artificial (131) o una fabricada con suelocemento (132).

- Finalmente, poder evaluar el impacto asociado a las operaciones de mantenimiento definidas y establecer cuáles son las etapas del ciclo de vida con un impacto ambiental asociado mayor, si la fase de fabricación y puesta en obra o la de mantenimiento y conservación.

## Capítulo 2

# EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Este estudio gira en torno al Análisis del Ciclo de Vida (ACV), una herramienta ampliamente utilizada para la evaluación ambiental de productos y procesos. En este capítulo se pretende hacer una introducción sobre este concepto, con el objetivo de conocer sus prestaciones, para después poder aplicarlas al sector de las carreteras, concretamente a las secciones de firmes.

En las próximas páginas se explica la evolución histórica del ACV, tanto a nivel nacional como internacional. Se define el concepto y las fases que lo componen, así como las normativas disponibles. También se hace una breve mención de cuáles son sus ventajas y de las limitaciones que presenta y, finalmente, se introduce el concepto de Análisis de Costes del Ciclo de Vida (CCV).

### 2.1. Historia del ACV

El nacimiento del Análisis del Ciclo de Vida se remonta a la década de los sesenta en Estados Unidos. Su historia puede dividirse en dos fases: una primera, desde los sesenta hasta finales de los ochenta, y una segunda, iniciada en los noventa y que todavía dura en la actualidad (*Haya, E., 2016*).

Los primeros estudios que tuvieron lugar en los 60 se basaban principalmente en el cálculo de los impactos ambientales referentes al uso de la energía. En 1969 el *Midwest Research Institute* realizó el primero de los trabajos de ACV para *Coca Cola*, con el fin de determinar el consumo de recursos y las emisiones asociadas a los diferentes tipos de envases (*Hunt et al., 96*).

Fue a mediados de la siguiente década, tras la crisis del petróleo de 1973, cuando empezaron a realizarse numerosos estudios para gestionar de un modo más óptimo los recursos energéticos disponibles. Empezaron a incluirse en los cálculos el consumo de las materias primas y la generación de residuos. Ese mismo año, se creó la primera herramienta informática de ACV, aunque presentaba numerosas limitaciones, por lo que el interés por el tema quedó estancado.

En el año 1979 es cuando tiene lugar la creación de la *Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)*, cuyo principal objetivo es el desarrollo de la metodología y el establecimiento de los criterios que deben regir todo ACV.

La segunda de las etapas históricas se inicia en los 90, donde el ACV comienza a ser un tema de ámbito internacional. Por este motivo, se realizaron tres seminarios en Washington, Vermont y Lovaina, organizados por *World Wildlife Found*, *SETAC* y *Procter & Gamble*, respectivamente. Es en este mismo momento, en 1993, cuando la SETAC se encargó de la publicación de guías para la realización de los inventarios del ciclo de vida. Éstas pretendían homogeneizar los estudios

para que todos siguiesen una misma metodología. También en este periodo, numerosas instituciones empezaron a desarrollar estudios sobre diferentes productos (Haya, E., 2016).

En referencia a las aplicaciones informáticas, empezaron a crearse entrados los 80, desarrollándose los primeros *software* específicos a finales de los 90. Con motivo de la aparición de estas herramientas, la ISO se encargó de establecer una estructura para uniformizar métodos, terminologías y procedimientos.

A nivel europeo, el ACV llegó durante los noventa a los países nórdicos. Suiza fue el primer país europeo en utilizar esta metodología, liderando la creación de bases de datos con el desarrollo de *Ecoinvent* iniciados los 2000. En 1993, se creó en Holanda una metodología (CML) que supuso la homogeneización de las metodologías disponibles (Haya, E., 2016).

A partir del nuevo milenio, la Unión Europea promovió enormemente la política medioambiental con la realización de diferentes congresos y la publicación del *Libro verde sobre la política de productos integrada* (COM, 2001) que intenta promover los productos ecológicos y un mercado más sostenible.

En el 2003 se creó la *European Platform on Life Cycle Assessment (EPLCA)* con el objetivo de asegurar la disponibilidad de unos datos de calidad para el ciclo de vida y de establecer metodologías comunes para realizar los estudios de ACV. Además, esta organización pretendía dar a conocer el ACV en las industrias y Administraciones Públicas. Gracias al gran trabajo de recopilación de datos, se elaboró la BBDDs *European Reference Life-Cycle Database (ELCD)* y el *ILCD Handbook (International Life Cycle Data System)*, un documento guía de referencia para la realización de Inventarios del Ciclo de Vida (ICV) a nivel internacional publicado en 2012 ([eplca.jrc.ec.europa.eu](http://eplca.jrc.ec.europa.eu), 2019).

Paralelamente, a lo largo de todo este tiempo, se ha ido realizando un trabajo de actualización, por parte de ISO, de las normativas sobre ACV vigentes, quedando en el año 2006 unificadas en la 14040 y la 14044.

Este crecimiento y el apoyo de la Unión Europea por la promoción de la gestión medioambiental, han hecho que el ACV se convierta a día de hoy en una herramienta muy utilizada. De hecho, recientemente, el sector de la construcción se ha dedicado a estudiar metodologías con el objetivo de evaluar la sostenibilidad medioambiental. Al ser la construcción de infraestructuras, en concreto las carreteras, el tema de interés de este estudio, en el siguiente capítulo (*Capítulo 3. El Análisis del Ciclo de Vida de Firmes*) se hablará sobre el ACV aplicado a los firmes.

## 2.2. El ACV en España

A nivel nacional, la evolución del ACV discurre con un desfase de aproximadamente 10 años. Los primeros movimientos tuvieron lugar en Cataluña, donde en 1993 se celebró en la localidad de Sitges el *Seminari Internacional Producte i Embalatge*. Un par de años más tarde, se creó la *Asociación Española para la Promoción del Desarrollo del Análisis de Ciclo de Vida (APRODACV)* que se encargó de organizar numerosas actividades relacionadas con el ACV (Doménech et al., 1996).

En el año 1997, se publicó el libro *Análisis de Ciclo de Vida*, la primera guía práctica sobre la aplicación del ACV en español (Fullana et al., 1997). Ya en el año 2000, se creó la Red Catalana del Ciclo de Vida, relevando a APRODACV, integrada por varias universidades catalanas y liderada por la *Universitat Autònoma de Barcelona*. En el año 2002, nace la *Red Temática de Análisis de Ciclo de Vida* en la Universidad de Santiago de Compostela, con el mismo objetivo que la anterior, pero a nivel estatal (Basañez et al., 2013).

También en el ámbito español, la Asociación Española de Normalización (UNE) se ha encargado de incorporar las normas 14040 y 14044 emitidas por la ISO. Además, el Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Vasco dispone de la Sociedad Pública IHOBE, autora del documento *Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono*. En esta publicación se describen los principios metodológicos del ACV y de la Huella de Carbono aplicada a la medición y evaluación del comportamiento ambiental de un producto (IHOBE, 2009).

Siguiendo la tendencia europea, en España también es cada vez más notable el interés por la gestión medioambiental y la aplicación de metodologías de ACV. En el gráfico adjunto (Figura 1) se muestra una evolución temporal de las publicaciones relacionadas con el ACV en las principales revistas científicas españolas hasta el año 2010. Se observa como durante los noventa apenas se publicaron un total de 3 artículos y fue a partir del 2002 cuando el número empieza a crecer lentamente. Es a partir del 2007 el momento en el cual se produce el despegue más significativo (Basañez et al., 2013).

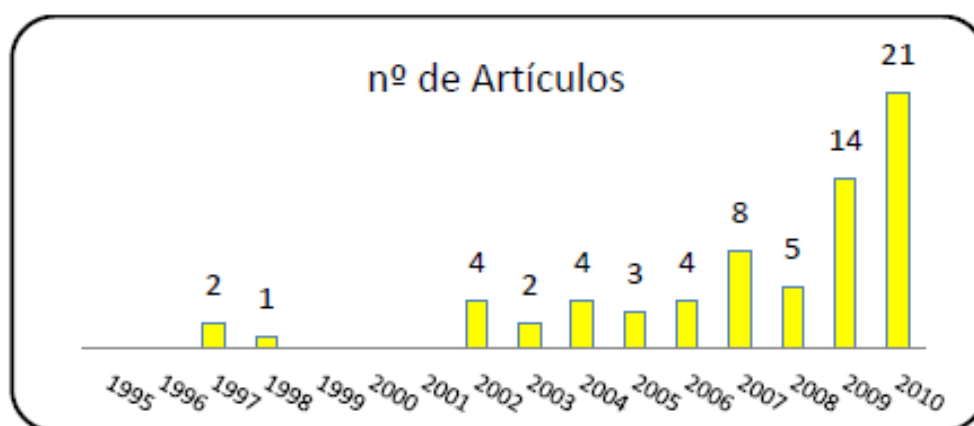


Figura 1 Evolución en el número de artículos de ACV. Fuente: Basañez et al., 2013.

Las temáticas más trabajadas en dichas publicaciones pertenecen en su mayoría a los sectores de la agricultura, la pesca o la alimentación. En menor medida, aparecen temas relacionados con la industria forestal, el sector textil, el sector químico, la construcción o los temas energéticos.

A partir del análisis realizado por Basañez et al. (2013) se observa como el 80% de los autores de los artículos son investigadores de las diferentes universidades españolas. El 20% restante pertenece a empresas y a organismos y asociaciones públicas y privadas. Sin embargo, este hecho no significa que el mundo empresarial no utilice el ACV, sino que los estudios realizados en las empresas rara vez terminan publicándose.



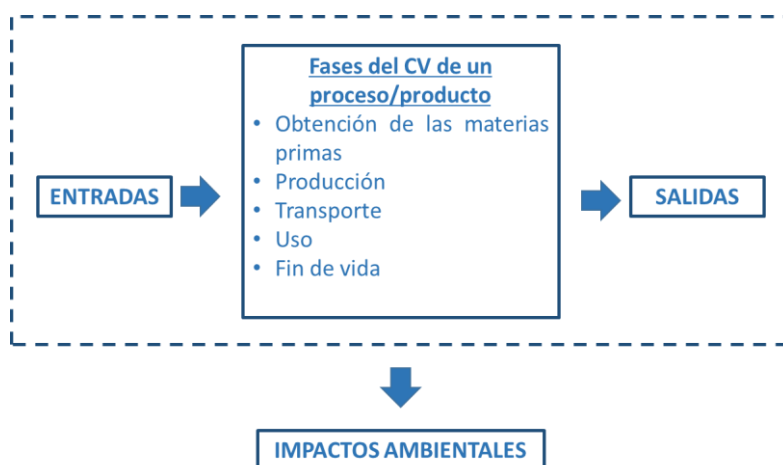
A pesar de no mostrarse en la *Figura 1*, hasta día de hoy, el interés por el ACV tiene una tendencia creciente gracias al impulso por el desarrollo sostenible. Actualmente, estos estudios son necesarios para la obtención de certificados de ecodiseño, declaraciones medioambientales y etiquetas ecológicas (Basañez et al., 2013).

### 2.3. Definición y objetivo

La SETAC define el Análisis del Ciclo de Vida como “*el proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno, para determinar su impacto en el medioambiente y para evaluar y poner en práctica estrategias de mejora ambiental*”.

En otras palabras, la Norma UNE-EN ISO 14040, afirma que el ACV es “*una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto mediante: la compilación de un inventario de entradas y salidas del sistema; la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados a estas entradas y salidas y la interpretación de los resultados de las fases de inventario y de impacto con relación a los objetivos del estudio*”.

Es decir, en un ACV se recopilan una serie de entradas (*inputs*) y salidas (*outputs*) de las diferentes fases que componen el sistema, con el objetivo de determinar los impactos ambientales potenciales generados, encontrando así estrategias para la reducción de los mismos (*Figura 2*).



*Figura 2 Esquema general de un sistema de ACV. Fuente: Elaboración propia.*

Las entradas suelen estar formadas por los materiales y recursos energéticos utilizados para la obtención del producto, mientras que las salidas constan de las emisiones al suelo, agua y aire o los residuos o subproductos generados durante su vida útil. Los impactos ambientales o categorías de impacto, obtenidos mediante el sumatorio de todos los *inputs* y *outputs*, son la destrucción de la capa de ozono, el calentamiento global, la acidificación, etc.

El ACV, por lo tanto, sirve como herramienta para el estudio objetivo de los recursos necesarios para la obtención de un producto y los efectos medioambientales de cada una de las etapas que lo componen.

## 2.4. Normativas

Para la correcta elaboración de todo ACV, existen varias normativas elaboradas por la *International Organization for Standardization (ISO)* e incorporadas a la normativa española (UNE - Asociación Española de Normalización) (*iso.org*, 2019). Principalmente las más importantes son:

- UNE-EN ISO 14040: 2006 “Gestión ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia”:

Contiene una descripción general del Análisis del Ciclo de Vida. En este punto se encuentran los principios del ACV, sus fases, las características esenciales de un ACV y los conceptos generales del sistema del producto.

Sin entrar en mucho detalle, en el *Capítulo 5. Marco de referencia metodológico* se describe la metodología a seguir para realizar un ACV. Se define el objetivo y el alcance, el análisis del inventario del ciclo de vida (ICV), la evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) y la interpretación del ciclo de Vida.

En el *Capítulo 6. Informes* se describe cómo deben ser los informes de las diferentes fases del estudio. Se explica cómo se debe informar de los resultados y las conclusiones, dependiendo del público al que se dirija el estudio, los métodos utilizados o las suposiciones consideradas.

Por último, incluye en el *Capítulo 7. Revisión crítica* la explicación de cómo debe ser revisado un ACV de manos de expertos internos o externos o por un panel de partes interesadas.

- UNE-EN ISO 14044: 2006 “Gestión ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices”:

Esta normativa complementa la anterior, proporcionando una descripción más detallada de la metodología a seguir para la realización de un ACV. Siguiendo la misma estructura de capítulos, describe las cuatro fases del análisis y como realizar los informes y la revisión crítica. Además, se especifican las limitaciones de un ACV, la relación existente entre las diferentes fases y las condiciones de uso de juicios de valor y elementos opcionales.

Adicionalmente a las normas anteriores, ISO también ha elaborado una serie de informes técnicos sobre el ACV:

- ISO/TR 14047: 2012 “Gestión ambiental. Evaluación del impacto del ciclo de vida. Ejemplos de la aplicación de la norma ISO 14044”:

Esta norma proporciona ejemplos de las prácticas habituales a realizar para la evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) siguiendo la norma ISO 14044. Únicamente proporciona algunos ejemplos entre todas las maneras posibles de cumplir con lo especificado en la ISO 14044 y refleja los elementos clave del EICV.

- ISO/TS 14048: 2002 “Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Formato de la documentación de datos”:

En este documento se presenta la estructura de formato de datos que se necesita para que la documentación con la que se presenten los datos del ACV y del EICV sea clara e inequívoca. Facilita especificaciones a seguir durante la recopilación de los datos, el cálculo de éstos y su calidad.

- ISO/TR 14049: 2012 “Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Ejemplos de aplicación de la ISO 14044 para la definición del objetivo, el alcance y para el análisis del inventario”:

Este informe técnico proporciona ejemplos sobre las prácticas de realización de la Evaluación de Inventario del Ciclo de Vida (EICV). Los ejemplos son únicamente una propuesta de cómo aplicar la metodología estándar para la realización del inventariado.

- ISO/TS 14071:2014 “Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Procesos de revisión crítica y competencias de los auditores”:

Detalla el proceso de revisión crítica, proporcionando directrices para que éste sea consistente, transparente y creíble. También alude a las aptitudes o competencias que deben tener los revisores (ya sean internos, externos o un panel de partes interesadas).

- ISO/TS 14072:2014 “Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices para la Evaluación del ciclo de vida organizacional”:

En el documento se mencionan las aplicaciones de los principios y metodologías del ACV a las organizaciones. Habla sobre los límites del sistema y especificaciones referentes al ICV, EICV e interpretación de resultados. También se mencionan las limitaciones de los informes y las declaraciones ambientales. Finalmente, se indican las ventajas que presenta el ACV para cualquier tipo de organización interesada en aplicarlo.

A pesar de las normativas citadas, el hecho de realizar un ACV siguiendo sus directrices no proporciona ningún tipo de acreditación oficial. No obstante, influye en la aceptación de los resultados por parte de terceros (*Perelli et al., 2018*).

## 2.5. Etapas del ACV

La Norma ISO 14040 define las fases o etapas a partir de las cuáles debe realizarse todo estudio de Análisis del Ciclo de Vida, detalladas a lo largo de este punto.

- **Etapas 1: Definición del objetivo, alcance y límites del sistema.** El alcance de un ACV, junto con sus límites y grado de detalle, depende del tema y del uso que pretende darse al estudio. La profundidad y amplitud del ACV puede diferir notablemente dependiendo de cuál sea su objetivo.
- **Etapas 2: Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV).** Se trata de un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema estudiado. Implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir con los objetivos definidos en el punto anterior.

- **Etapas 3: Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV).** Proporciona información adicional para ayudar a evaluar los resultados del ICV de un sistema del producto para poder comprender mejor su importancia ambiental.
- **Etapas 4: Interpretación de los resultados.** Se resumen y valoran los resultados del ICV, del EICV o ambos, para elaborar unas conclusiones y recomendaciones, pudiendo tomar decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

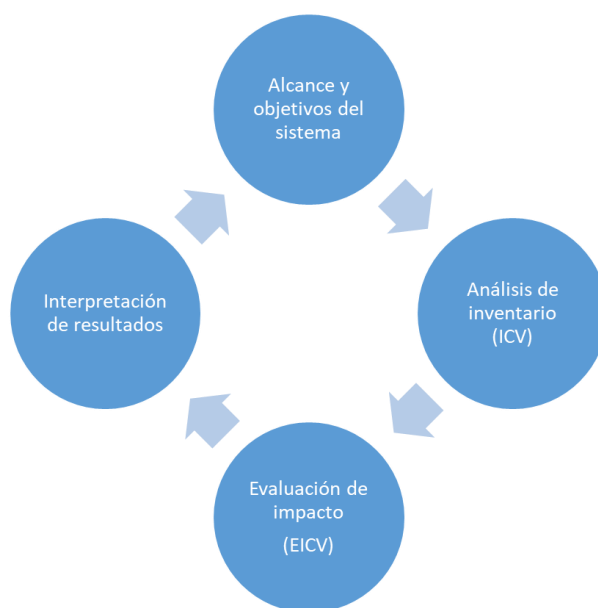


Figura 3 Etapas de un ACV. Fuente: Norma UNE-EN ISO 14040 (2006).

### 2.5.1 Definición del objetivo, alcance y límites del sistema

En la primera de las etapas del ACV es necesaria una definición clara y detallada del principal objetivo del estudio. Según la Norma ISO, éste debe cumplir los siguientes aspectos:

- Exposición de los motivos por los que se efectúa el ACV.
- Información del producto, funciones y etapas de su ciclo de vida.
- Público al que se dirige, ya que puede tratarse de un estudio para la Administración, un estudio interno de la empresa, etc.
- En relación al punto anterior, descripción del modo de presentación de los resultados.

Por otro lado, la definición del alcance y límites se basa en la magnitud y detalle del estudio, incluyendo:

- La selección de la Unidad Funcional.
- Descripción y funciones del sistema.
- Los límites del sistema: las etapas o puntos incluidos en el estudio y aquellos que han sido descartados.
- El grado de detalle.

- Las hipótesis consideradas.
- Las limitaciones encontradas.
- El procedimiento seguido para la Evaluación de los Impactos.
- La calidad de los datos utilizados.

La Unidad Funcional se define, según la ISO 14040, como “*el desempeño cuantificado de un sistema de producto para su uso como unidad de referencia*”. En otras palabras, es la medida a la que van referidas todas las entradas y salidas del sistema.

El hecho de tener todos los datos referenciados a una misma unidad, permite hacer comparaciones en base a la misma. Por este motivo, es muy importante que ésta sea medible y descrita de manera clara y precisa.

Los límites del sistema definen cuáles son aquellas entradas y salidas que se incluyen en el sistema y las que quedan excluidas, determinándose así los procesos que deben considerarse en el ACV. Es importante un establecimiento lógico de los límites, eliminando únicamente aquellas etapas o *inputs/outputs* que no sean decisivos en los resultados.

Dependiendo de cuáles sean estos límites, podemos clasificar un estudio del Ciclo de Vida como (Figura 4):

- De la puerta a la puerta (*gate to gate*): se considera únicamente el proceso de fabricación del producto.
- De la cuna a la puerta (*cradle to gate*): se considera el proceso de obtención de las materias primas y recursos energéticos utilizados junto con el proceso de fabricación.
- De la cuna a la tumba (*cradle to grave*): se considera el ciclo de vida completo. Desde la obtención de las materias primas, producción, transporte, uso y hasta su fin de vida.
- De la cuna a la cuna (*cradle to cradle*): al ciclo de vida completo se le añaden las salidas de la etapa de fin de vida, que pueden reciclarse y volver a ser entradas en forma de materia prima o convertirse en entradas de otros sistemas.

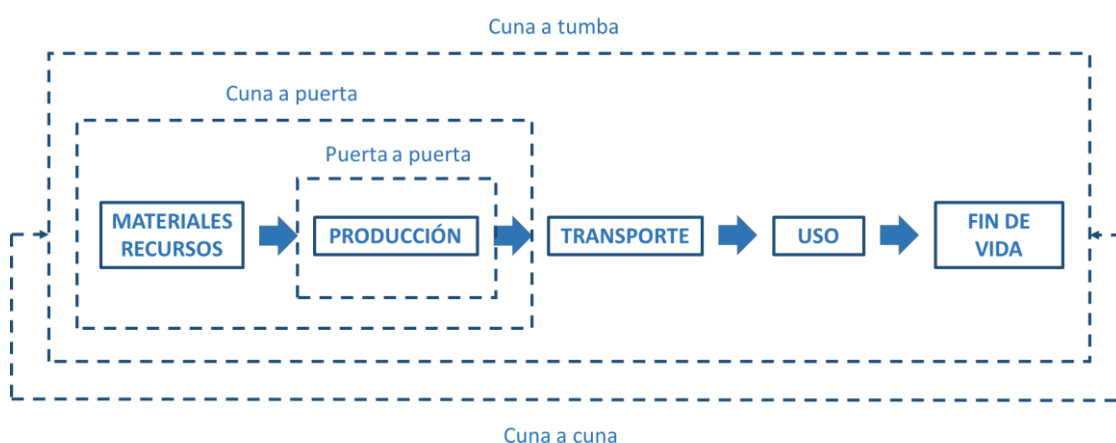


Figura 4 Alcance de un ACV según los límites. Fuente: Elaboración propia.

No obstante, pueden realizarse dos ACVs con la misma definición de límites, pero cuyos grados de detalle sean muy diferentes. El grado de detalle depende de cuál sea el objetivo del análisis, diferenciándose entre:

- ACV completo: grado de detalle muy elevado de los datos de inventario y de los impactos ambientales generados.
- ACV simplificado: nivel de detalle intermedio, únicamente se tienen en cuenta datos genéricos y las etapas más representativas del ciclo de vida del producto.
- ACV conceptual: es el que tiene un menor detalle. Se basa en identificar los impactos potenciales más significativos, utilizando datos de inventario muy generales.

Finalmente, el grado de detalle depende también de la calidad de los datos disponibles, que a la vez tendrá una gran influencia en los resultados que se obtengan. Es importante considerar el lugar geográfico y temporal donde han sido tomados, la precisión, la dificultad de reproducción, etc. (Perelli et al., 2018).

### 2.5.2. Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

La recopilación completa de las entradas y salidas, es decir los datos del sistema, es lo que se conoce como el Inventario del Ciclo de Vida (ICV). Esta etapa suele ser la más larga dentro del proceso de realización de un ACV, puesto que la cantidad de datos a recopilar es muy elevada.

Dentro del inventario de un sistema o proceso deben identificarse y cuantificarse los siguientes datos:

- Materiales utilizados.
- Recursos energéticos.
- Emisiones ambientales (al aire, agua y suelo) u otros residuos.
- Generación de productos o subproductos.

Los dos primeros puntos hacen referencia a los datos de entrada del sistema, mientras que los dos restantes corresponden a las salidas. Todos ellos deben referenciarse a la unidad funcional.

Por la enorme influencia que tendrán en los resultados, la obtención de los datos debe ser validada y correctamente documentada, indicando el modo cómo se han obtenido éstos y su origen. En la actualidad, existen numerosas bases de datos disponibles (tanto genéricas como sectoriales o específicas) que se caracterizan por la enorme cantidad de datos recopilados. A continuación, se habla brevemente de algunas de las de tipo genérico más conocidas:

- *EcoInvent* ([ecoinvent.org](http://ecoinvent.org), 2019): nació en 2003 y su última versión (*EcoInvent 3.5*) es de agosto del 2018. Es una de las BBDD de ACV más completas y reconocidas. Al ser de origen suizo, sus datos son principalmente suizos y alemanes, aunque aplicables con limitaciones a nivel europeo.

Se trata de una base de datos genérica con más de 14.700 datos relativos a: materiales de construcción, productos químicos, agricultura, energía, transporte, gestión de residuos, etc. Incluye también una gran variedad de indicadores ambientales. Es

imprescindible que sea utilizada mediante un *software* informático, debido a la gran cantidad de datos que contiene. Para su utilización se requiere de una licencia de pago aunque se encuentra incorporada en la mayoría de programas informáticos generalistas de ACV (como *SimaPro* o *Umberto*).

- *GaBi Professional Database* (*gabi-software.com*, 2019): es la base de datos propia de la otra herramienta más común de ACV: *GaBi software*. Fue elaborada por la consultora alemana *PE International GmbH* junto con la Universidad de Stuttgart, hace más de 30 años.

Contiene más de 12.500 planes y procesos basados en datos primarios y un inventario de más de 32.000 datos (el más amplio en la actualidad). Los datos son actualizados anualmente mediante el trabajo colectivo entre compañías, asociaciones y organismos públicos, incluyendo los principales sectores industriales (alimentación, metalurgia y minería, textiles, plásticos, construcción, electrónica, etc.). También incluye los principales indicadores ambientales. Los datos han sido obtenidos en 20 países y todos ellos cumplen con los estándares de las normativas ISO 14044, ISO 14064 e ISO 14025.

- *U.S. LCI database* (*nrel.gov/lci*, 2019): el proyecto se inició en 2001 aunque fue en el congreso del *U.S. Life Cycle Inventory (LCI) Data Stakeholder* de 2009 donde tomó verdadera forma. El centro de investigación NREL y numerosos expertos en ACV, junto con accionistas privados, trabajan para mantener la base de datos constantemente actualizada.

Esta base de datos se encuentra disponible *online* y, en la página web del NREL, es posible descargar más de 3.000 módulos de datos para cuantificar los flujos de materiales y energía de los procesos más comunes de los EE.UU. Los datos siguen las indicaciones de la norma ISO/TS 14048:2002.

Sin embargo, no siempre se encuentran los datos necesarios para la realización de un análisis concreto y puede ser necesario la creación de nuevas entradas o salidas. Éstas deberán ser contrastadas con datos existentes para verificar que los datos sean representativos.

### 2.5.3. Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

La tercera etapa del ACV consiste en la asignación de los datos del Inventario del Ciclo de Vida a las categorías de impacto elegidas (*detalladas en el punto 2.6. Categorías de impacto*). Su estructura viene definida en la Norma UNE-EN ISO 14044 y distingue entre elementos obligatorios y opcionales (*Figura 5*).

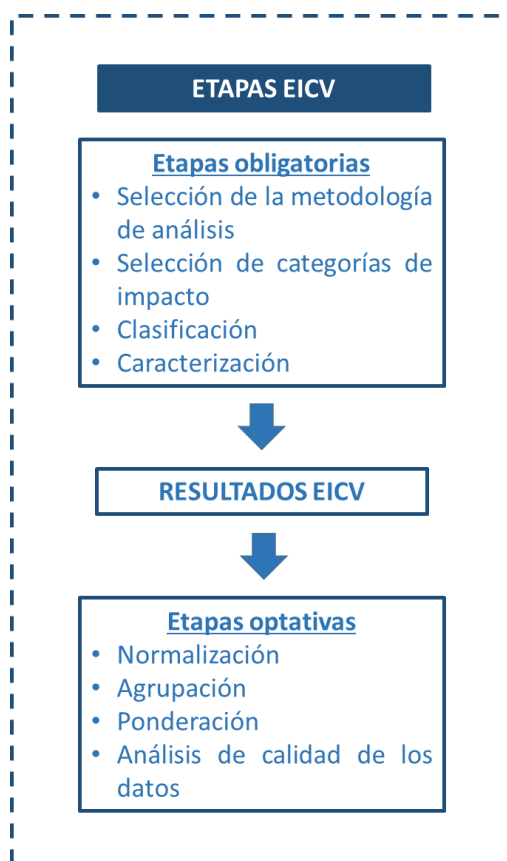


Figura 5 Etapas del inventario de un ACV. Fuente: Elaboración propia.

Los elementos o partes que se consideran como obligatorios son:

- La selección del tipo de metodología de análisis de impacto que va a seguirse. Existen metodologías de efecto intermedio (*midpoint*) o de efecto final (*endpoint*).
- La selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos.
- La clasificación, que consiste en la asignación a cada categoría de impacto de todos los datos del inventario. Las categorías de impacto dependerán del tipo de metodología escogido.
- La caracterización, que consiste en referenciar a la unidad funcional todos los datos de una categoría para obtener un indicador ambiental en cada categoría de impacto.

Los elementos opcionales pueden aplicarse dependiendo de cuál sea el objetivo y el alcance del estudio, y son:

- La normalización, que se basa en convertir los resultados de la caracterización a unidades globales neutras, mediante la división por un valor de referencia, ya sea a escala geográfica y/o temporal.

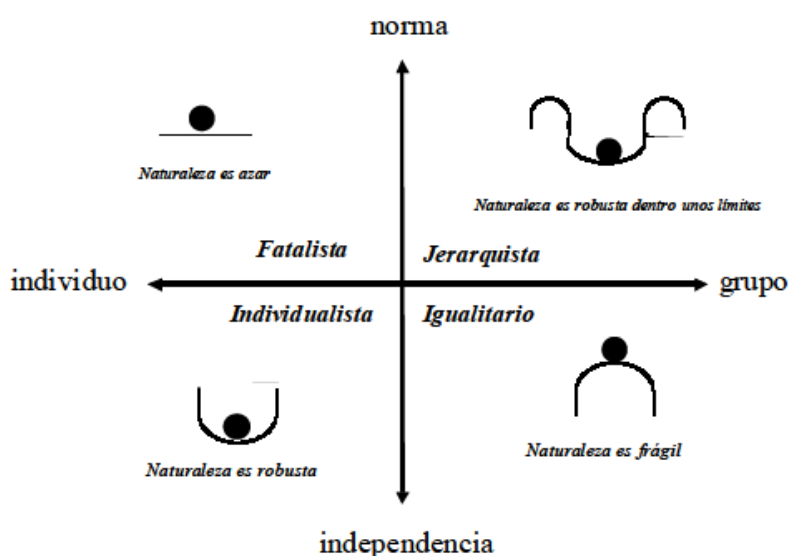
Merece la pena mencionar el libro *Global environmental impacts and planetary boundaries in LCA* (Sala S. et al., 2016) que recoge, para las 15 categorías de impacto más comunes, metodologías de cálculo de los factores de normalización utilizados para estimar la importancia relativa de los impactos asociada a un producto o proceso. En el estudio se explora la factibilidad de cálculo de diferentes sets de factores de normalización y como éstos se comportan al aplicarlos al ACV.



- La agrupación, que consiste en englobar categorías de impacto con efectos similares.
- La ponderación, que consiste en la asignación de una importancia relativa a las categorías de impacto, para después sumarlas y obtener un resultado ponderado de un único índice ambiental global.

El proceso de ponderación puede llegar a ser muy complicado, puesto que no siempre es fácil valorar la importancia de los diferentes daños. Existen cuatro perspectivas social-culturales, con distintas concepciones de la naturaleza, con unos modelos ya establecidos (*Figura 6*). Estos cuatro sistemas de organización nacen del trabajo de los antropólogos Douglas (1970) y Milton (1991), fueron recogidos por Cowell (*Cowell, 1998*) y son:

- La perspectiva individualista (*Individualist*): muestra una perspectiva muy individualista e independiente, motivada principalmente por el provecho personal. Concibe la naturaleza como algo robusto, capaz de adaptarse a los posibles impactos. Cree en el optimismo tecnológico, es decir, que la tecnología puede evitar muchos problemas. Su interés es a corto plazo.
- La perspectiva jerárquica (*Hierarchist*): el individuo tiene una clara concepción de pertenecer al grupo y sus acciones están dirigidas por el sistema. Tiene una visión de la naturaleza con robustez, pero dentro de unos límites, controlados por el gobierno y la legislación, y cree en un avance tecnológico medio. Su interés es un balance entre plazos cortos y largos en el tiempo.
- La perspectiva igualitaria (*Egalitarian*): sentimiento claro de pertenencia al grupo pero a la vez actuando con total independencia, aplicando sus propias normas. El bien general prevalece sobre el provecho personal. La naturaleza es percibida como algo muy frágil y que exige de nuestra responsabilidad. Su razonamiento cree que los problemas pueden llevar a la catástrofe. Su interés es a largo plazo, considerando un avance más lento en el desarrollo y siendo la perspectiva más conservadora.



*Figura 6 Perspectivas socio-culturales y su relación frente a la sumisión al grupo y a la normativa.*  
Fuente: Cowell, 1998.

Una vez hecha la ponderación, se obtiene que el sistema tiene un impacto ambiental global de “P” puntos sobre los 100 puntos de carga ambiental anual equivalente de un ciudadano europeo (*Ecoindicator '95 methodology*).

- El análisis de calidad de los datos, para la identificación de aquellos elementos más significativos del ACV y los que presentan un mayor grado de incertidumbre y sensibilidad.

Es posible que sean necesarias técnicas adicionales como el análisis de sensibilidad o incertidumbre. Los análisis de sensibilidad permiten determinar cómo se ven afectados los resultados al modificar los datos. Los análisis de incertidumbre muestran como las incertidumbres de los datos y las hipótesis adoptadas influyen en el comportamiento de los resultados.

#### **2.5.4. Interpretación de los resultados**

La cuarta y última etapa se fundamenta en la interpretación de los resultados de las etapas anteriores. Debe comprobarse que los resultados obtenidos son coherentes con el objetivo y alcance del estudio. Este proceso de interpretación debe ir realizándose a lo largo de todo el proceso para evitar tener que abordar posibles errores al final. En esta fase se deberán:

- Identificar problemas importantes.
- Verificar la consistencia de los resultados.
- Elaborar conclusiones, recomendaciones e informes.

Gracias a las conclusiones extraídas y a la redacción de los informes, se podrán proponer mejoras, como por ejemplo, cambios en el proceso de fabricación de un producto, modificaciones en los materiales utilizados, una reducción de la cantidad de residuos generada, etc.

### **2.6. Categorías de impacto**

Como se ha mencionado con anterioridad (*apartado 2.5.3. Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV)*), es necesario asociar cada una de las entradas y salidas del sistema a una o varias categorías de impacto. Esta asociación permite calcular cuál es la contribución relativa de cada uno de los datos de inventario a la categoría de estudio. Las categorías de impacto se expresan en unidades de referencia a las que se refieren todos los datos, con el objetivo de poder sumar todas las contribuciones.

Dependiendo del tipo de Análisis del Ciclo de Vida que quiera realizarse, es decir, de cuál sea su objetivo o del público al que se dirija, puede resultar interesante trabajar con unas categorías de impacto u otras. Sin embargo, la SETAC define cuáles son las principales categorías de impacto y sus unidades de referencia (*Tabla 1*).

Tabla 1 Principales categorías de impacto ambiental. Fuente: SETAC.

Categoría de impacto ambiental	Unidad de referencia (Ecoindicador)	Factor de caracterización
Calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> eq	Potencial de Calentamiento Global (PCG)
Consumo de recursos energéticos	MJ	Cantidad consumida
Reducción de la capa de ozono	kg CFC-11eq	Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (PAO)
Eutrofización	kg NO <sub>3</sub> eq	Potencial de Eutrofización (PE)
Acidificación	kg SO <sub>2</sub> eq	Potencial de Acidificación (PA)
Consumo de materias primas	tm	Cantidad consumida
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	Potencial de Formación de oxidantes fotoquímicos (PFOF)

En las siguientes líneas se describe brevemente qué incluye cada una de las categorías de la tabla anterior (Tabla 1):

- Calentamiento global: aumento de la temperatura promedio de la atmósfera terrestre y de los océanos. Este fenómeno, cada vez más presente, se debe principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero (básicamente de dióxido de carbono) y la deforestación, que también contribuye a un aumento de los niveles de CO<sub>2</sub> (y otros gases como CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CFCs) en la atmósfera.
- Consumo de recursos energéticos: energía que se consume durante los procesos de obtención de las materias primas, de construcción o fabricación, de transporte, de uso y de fin de vida del producto o proceso objeto de estudio.
- Reducción de la capa de ozono: deterioro de esta capa de la atmósfera debido en su mayor parte a las emisiones de gases clorofluorocarbonos (CFC), concretamente los cloruros y bromuros que proceden de éstos. La capa de ozono actúa como un filtro absorbiendo la radiación ultravioleta. Su disminución provoca un incremento de las radiaciones UV que llegan a la superficie de la Tierra, provocando enfermedades sobre los humanos, alteraciones en los ecosistemas, etc.
- Eutrofización: proliferación descontrolada de las algas que hay en un ecosistema acuático, provocada por los vertidos de actividades humanas. Esta abundancia anormal de macronutrientes, sobretudo nitrógeno y fósforo, crea una capa en la superficie del agua, que impide el paso de la luz impidiendo el desarrollo normal de la vida a mayores profundidades. En consecuencia, aumenta el consumo de oxígeno en el medio acuático provocando unas condiciones anaerobias y la liberación de CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S y NH<sub>3</sub>.
- Acidificación: pérdida de la capacidad neutralizadora como consecuencia del retorno a la superficie de la Tierra en forma de ácidos de los óxidos de azufre y nitrógeno emitidos a la atmósfera. Estos ácidos se quedan en la atmósfera, suelo y agua, variando su acidez y provocando alteraciones en la flora y fauna.

- Consumo de materias primas: consumo, y consecuentemente disminución, de las materias disponibles en la naturaleza.
- Formación de oxidantes fotoquímicos: formación en la atmósfera de oxidantes al reaccionar los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno con la radiación ultravioleta. Estos oxidantes fotoquímicos, siendo el ozono troposférico ( $O_3$ ) el más conocido, dan lugar a la contaminación fotoquímica muy presente en las grandes ciudades, sobre todo a primeras horas de la mañana y durante los meses de verano.

Aparte de estas categorías definidas por la SETAC, pueden encontrarse también entre las más aceptadas otras como: la ecotoxicidad, el uso del suelo, el agotamiento de los recursos minerales o el de los recursos fósiles. Además, en los últimos años, ha habido un creciente interés por otras categorías como podrían ser el ruido, la erosión, o incluso, la salud laboral.

Tal y como se ha dicho anteriormente, estas categorías de impacto pueden agruparse en dos tipos: las de efecto intermedio (*midpoint*) y las de efecto final (*endpoint*). Las primeras incluyen las categorías de impacto con una influencia directa sobre el medio ambiente. Las segundas incluyen las categorías que influyen directamente a la sociedad (*Figura 7*).

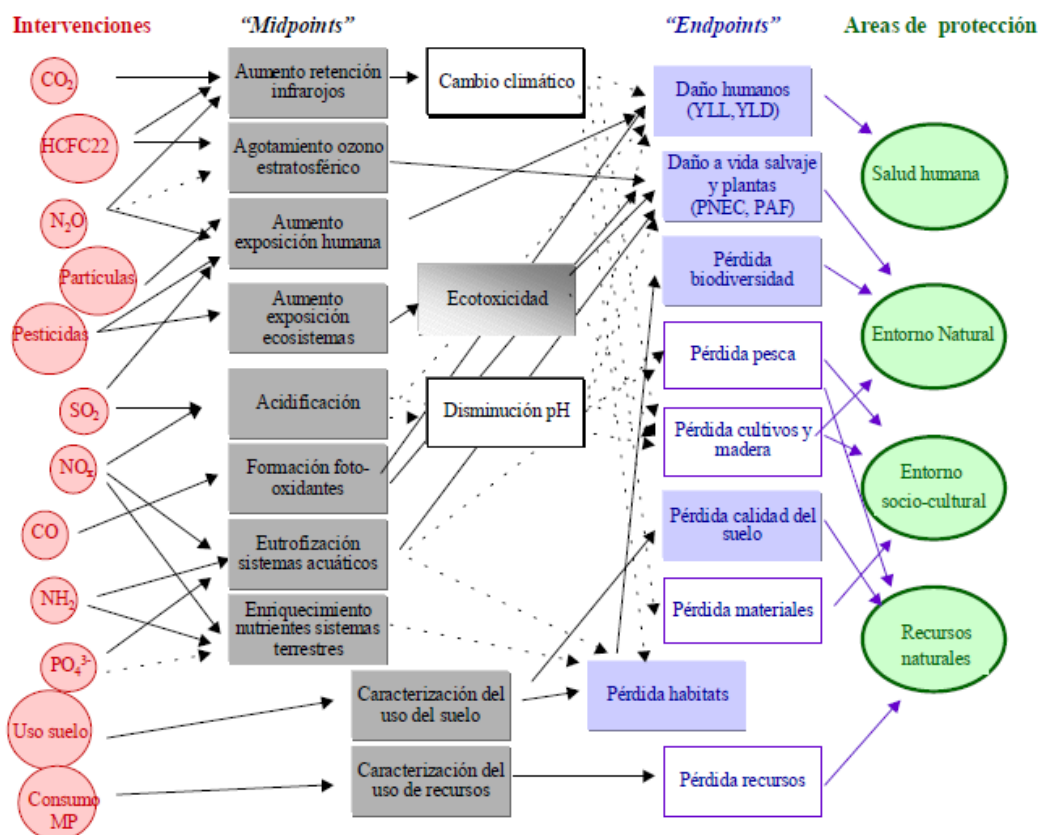


Figura 7 Relación entre efectos de impacto intermedios y finales. Fuente: Udo de Haes et al., 1999.

Una vez se ha asignado cada uno de los datos del inventario a una o más categorías de impacto, puede compararse su valor con respecto a una unidad de referencia (Ecoindicador). Dicha comparación o caracterización es realizada gracias a los factores de caracterización que representan la contribución de una sustancia a una determinada categoría de impacto respecto a la sustancia de referencia (Ecoindicador).

## 2.7. Beneficios del ACV

El ACV es una herramienta muy útil para la toma de decisiones relativas a las estrategias de mejora ambiental, tanto para el sector público como privado. En este apartado se pretende enumerar los principales beneficios que pueden obtenerse mediante este tipo de análisis.

Primeramente, es una herramienta que permite identificar y medir los impactos ambientales potenciales asociados a un producto, proceso o sistema, a lo largo de todo su ciclo de vida. También permite determinar el impacto global del ciclo de vida.

Los resultados permiten jerarquizar las etapas del ciclo de vida, determinando las que generan un mayor impacto (puntos críticos), para poder definir estrategias que los reduzcan. Pueden minimizarse los recursos, disminuir la cantidad de residuos generados, implantar mejoras de eficiencia energética o reducir la cantidad de emisiones.

En segundo lugar, permite las comparaciones entre dos productos de diferente naturaleza pero con aplicaciones similares o del mismo producto pero de distintas marcas (*benchmarking*). Pueden compararse incluso dos procesos diferentes de fabricación para un mismo producto, sirviendo como herramienta de decisión durante la fase de diseño del producto.

Un estudio de ACV no resulta únicamente interesante para la empresa en cuestión. La Administración puede hacer uso de las conclusiones extraídas para la redacción de la legislación y de las políticas ambientales, favoreciendo la conservación de recursos y reduciendo el riesgo ambiental asociado a los productos y procesos.

El ACV es la cuna de un consumo y producción sostenible (*Sustainable Consumption and Production, SCP*), constituyendo el soporte técnico del Ecodiseño (*Ecodesign*), las Ecoetiquetas (*Ecolabelling*), las Declaraciones Ambientales de Producto (*DAP; Environmental Product Declaration, EPD*), la Huella de Carbono (*HC, Carbon Footprint*), la Huella Hídrica o de Agua (*HH o HA, Water Footprint, WF*) y la Contratación o Compra Pública Verde (*CCPV; Green Public/Private Procurement, GPP*) (Perelli et al., 2018).

Además de tener beneficios medioambientales, consiguiendo la reducción de impactos, un estudio de ACV también puede suponer una reducción de costes para la empresa, produciéndose un ahorro en el consumo de materias primas o recursos energéticos. A partir de los resultados, pueden encontrarse mejoras en el producto y su proceso de fabricación, aumentando su calidad y, por consiguiente, una mejora de la imagen de la empresa.

Como conclusión, la realización de un ACV aporta una serie de beneficios que se resumen en los siguientes puntos:

- Medioambientales (reducción de impactos).
- Reducción de costes (optimización del uso de materiales y recursos).
- Innovación (búsqueda de nuevas soluciones).
- Cumplimiento de la legislación.
- Mejora de la imagen de la empresa.
- Aumento de la calidad y del valor del producto.

## 2.8. Limitaciones del ACV

Como se ha visto previamente (*punto 2.7. Beneficios del ACV*), son numerosas las ventajas de este tipo de análisis. Sin embargo, tal y como se resume en la monografía *Análisis Ambiental y de Costes en el Ciclo de Vida de Firms y Pavimentos* (Perelli et al., 2018), la metodología del ACV presenta ciertas limitaciones.

En primer lugar, no hay una seguridad total sobre la fiabilidad de los datos de entrada disponibles y existe cierta incertidumbre sobre los procesos. Esto se debe principalmente a la subjetividad inherente de la persona o empresa que realiza el estudio. Aun así, en la fase de inventariado, los valores de las cargas ambientales intentan objetivar los datos y parámetros utilizados.

No ocurre lo mismo con los impactos ambientales, puesto que su identificación, evaluación y ponderación frente a los demás impactos se basa en criterios subjetivos. También puede que sean subjetivas algunas de las hipótesis consideradas, como por ejemplo los límites del sistema (*sgs.es 2019*).

Adicionalmente al subjetivismo descrito en el párrafo anterior, también tiene una gran influencia la perspectiva socio-cultural que se utilice para la ponderación y el análisis los métodos y resultados del ACV (*explicadas en punto 2.5.3. Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV)*).

En segundo lugar, se trata de estudios con un elevado coste, puesto que se requiere de mucho tiempo para la recopilación de todos los datos. También se debe adaptar el alcance del ACV a nuestras necesidades, encontrar el *software* adecuado (de entre los muchos disponibles, tanto generales como específicos) y dominar su manejo. Además, muchas de las herramientas informáticas y bases de datos disponibles son privadas (como por ejemplo *Ecolnvent*) con un coste económico elevado.

En tercer lugar, no se considera la escala temporal cuando se evalúa la emisión de flujos. En un ACV todos los impactos son incluidos de la misma manera, independientemente del momento en que se produzcan. Sin embargo, puede que haya ciertas sustancias químicas cuyo efecto dependa de la estación del año o de la intensidad de la luz (por ejemplo, los agentes fotoquímicos).

Tampoco considera la escala geográfica aunque los resultados de un ACV de ámbito global o regional puede que no sean apropiados para una aplicación local, es decir, las condiciones locales no tienen por qué verse representadas por las condiciones globales o regionales. Del mismo modo, la extrapolación de un estudio local a diferentes países puede llevar a errores. En resumen, en la suma de flujos no se considera ni el momento ni el sitio en que han tenido lugar.

Finalmente, supone una relación lineal entre los impactos y las cantidades contaminantes liberadas. Sin considerar los valores umbrales, sinergias, resiliencia, persistencia, etc.

## 2.9. Análisis de Costes del Ciclo de Vida (CCV)

A pesar de no ser propiamente objeto de este estudio, se ha creído conveniente hacer una breve mención sobre el Análisis de Costes del Ciclo de Vida (CCV). Se conoce como CCV *el cálculo y la valoración de todos los costes asociados a un producto o servicio determinado, que son sufragados directamente por uno o varios agentes a lo largo del ciclo de vida completo del mismo* (Hunkeler, D. et al., 2008).

En rasgos generales, se trata de una herramienta que permite analizar cómo evolucionan los ingresos y los gastos asociados a un producto, para poder decidir si es rentable o no. Un CCV valora no únicamente los costes iniciales de diseño y elaboración del producto (los costes presentes), sino que también considera los de utilización y eliminación del mismo (los costes futuros).

De hecho, analizando el gráfico (Figura 8), puede observarse cómo normalmente durante la etapa de desarrollo del producto únicamente se generan pérdidas. Con la introducción en el mercado del nuevo producto se generan poco a poco beneficios, hasta que se alcanza el periodo de madurez. Finalmente, durante la última etapa del ciclo de vida, empieza el declive de las ganancias hasta que llega el momento de su fin de vida, retirándolo del mercado o reciclándolo. En caso de la última opción, se debe estimar el valor residual de los elementos que se puedan recuperar o reutilizar.



Figura 8 Ciclo de vida del producto. Fuente: PDCA Home.

El análisis de los costes permite, en primer lugar, contabilizar los costes relativos al ciclo de vida del producto o servicio y aquellos ligados a los distintos agentes (como por ejemplo, los usuarios). En segundo lugar, facilita el encuentro de mejoras potenciales y cambios en la elaboración del producto, innovaciones, búsqueda de nuevos suministradores, etc. En tercer lugar, permite hacer comparativas entre diferentes alternativas. Finalmente, si se combina con un ACV, permite minimizar simultáneamente los costes y los impactos durante el ciclo de vida.

Mediante la integración del ACV y CCV se consigue seleccionar la alternativa más conveniente tanto a nivel económico como medioambiental. Son importantes ambas consideraciones puesto que las externalidades medioambientales pueden tener un coste elevado, como por ejemplo, los GEI en procesos de transporte.

Habitualmente el proceso que se sigue se basa en la cuantificación de algunos de los impactos del ACV en términos monetarios. Tras la obtención de los costes, se incluyen en el CCV como externalidades medioambientales. Pese a lo interesante de dicha combinación, en la actualidad no existe una metodología establecida para el cálculo de los costes de los impactos, con un elevado carácter subjetivo.



## Capítulo 3

### EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE FIRMES

Una vez conocida la herramienta del Análisis del Ciclo de Vida, y siguiendo la misma estructura que en el capítulo anterior, se describe en este punto el procedimiento del ACV aplicado al caso particular de los firmes de carreteras (ACVF). Se detallan las diferentes fases que componen un estudio de ACVF y, finalmente, se presentan también algunas de las limitaciones actuales.

#### 3.1. Introducción y objetivo del ACVF

Tal y como se ha descrito en el *Capítulo 2. Análisis del Ciclo de Vida*, los primeros estudios sobre ACV aparecieron durante los años 60. Sin embargo, la primera referencia española para el caso del sector de carreteras es del 1985, cuando la *Asociación Española Permanente de los Congresos de Carreteras* editó el “*Manual de evaluación energética de proyectos de carreteras*”, cuyos autores fueron los ingenieros Víctor Sánchez, Luis Ramos y Miguel Ángel del Val (Sampedro, A., 2011).

En los últimos años, la implementación de la técnica del ACV en las infraestructuras viarias ha evolucionado notablemente. De hecho, Alberto Moral (Moral, A., 2016) en su tesis doctoral muestra como se ha producido un aumento lineal en el número de publicaciones científicas relacionadas con la herramienta ambiental del ACV y el sector viario (Figuras 9 y 10).

En la figura superior (Figura 9), se observa como el número de artículos encontrados realizando la búsqueda “*LCA & Asphalt*”, es decir ACV y asfalto, ha incrementado un 411% en la última década. Del mismo modo, la figura inferior (Figura 10) muestra el incremento del 762% de los artículos relacionados con el ACV y los pavimentos, “*LCA & Pavement*”.

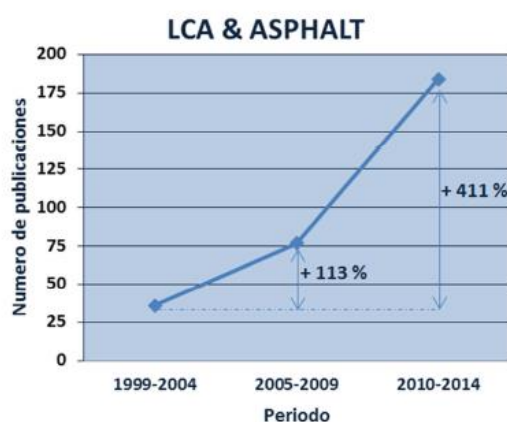


Figura 9 N° de publicaciones referenciadas en Sciencedirect vinculadas a los términos LCA y Asphalt. Fuente: Moral, A., 2016.

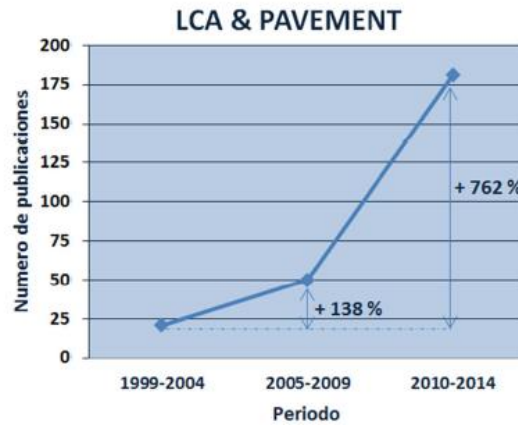


Figura 10 N° de publicaciones referenciadas en Sciencedirect vinculadas a los términos LCA y Pavement. Fuente: Moral, A., 2016.

Además, en la tesis se comparan las búsquedas anteriores con el crecimiento de las publicaciones relacionadas con el sector de la construcción de carreteras (*road construction*) (Figura 11). De los resultados se obtiene que, a pesar de existir muchas más publicaciones sobre procesos vinculados a las carreteras, la tendencia creciente es mucho más acusada en los dos casos relativos al ACV.

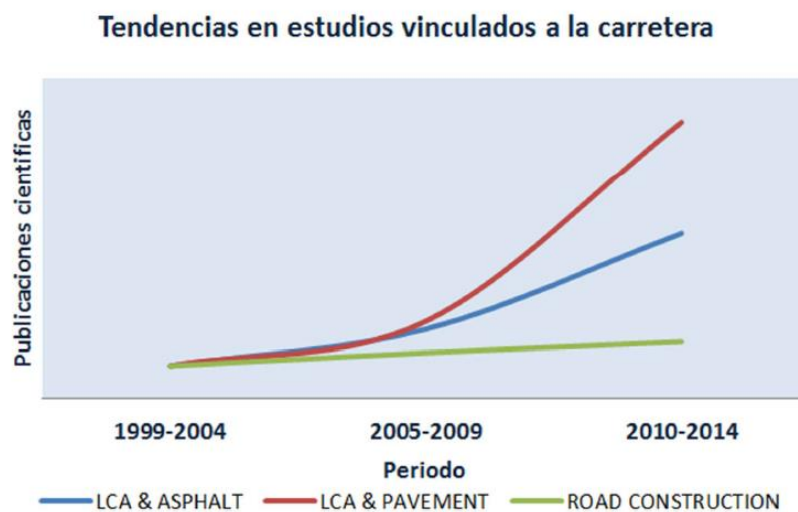


Figura 11 Tendencia en el aumento porcentual de publicaciones científicas en Sciencedirect. Fuente: Moral, A., 2016.

El aumento del interés por conseguir unas “*carreteras sostenibles*” hace que sea necesario evaluar todas y cada una de las fases que componen su vida útil, empezando por la planificación y hasta llegar a su fin de vida. Deben evaluarse, en cada una de las etapas, las afecciones medioambientales que se producen para poder escoger aquellas soluciones que menos comprometan nuestro entorno. En otras palabras, el ACV debe permitir evaluar la sostenibilidad de las diferentes alternativas, considerando las etapas de diseño, construcción, conservación y explotación.

Por este motivo, siguiendo las indicaciones de la *Plataforma Tecnológica Española de la Carretera (PTC)* (Sampedro, A., 2011), se debe:

- Diseñar y proyectar la carretera para que, tras un correcto y amplio estudio, se defina la solución que menos afecciones produzca.  
Este punto es el más relevante, puesto que de él dependen los demás. Deben evaluarse desde el punto de vista de la sostenibilidad los diferentes procesos constructivos disponibles, con tal de definir y adoptar el que menos energía consuma, menos emisiones genere, etc.
- Analizar con detalle la etapa de construcción, optimizando los procesos y los materiales utilizados. Deben utilizarse aquellas técnicas y materias que sean más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.
- Construir y gestionar redes de carreteras cuya fase de explotación minimice las afecciones medioambientales.

Para poder aplicar los puntos anteriores a cualquier ACV de una carretera, es necesario que se tengan datos fiables de las principales etapas de su vida. Concretamente, es necesario tener conocimiento de:

- Los recursos empleados y las emisiones para la obtención de las materias primas.
- Los recursos empleados y las emisiones para la obtención de las unidades de obra utilizadas.
- Los recursos empleados y las emisiones para transportar las materias primas.
- El transporte y los trabajos necesarios para la ejecución o construcción del firme (extendido, compactación).
- Las actuaciones de conservación y rehabilitación.
- Tras el fin de su vida útil, la demolición final o posterior reconstrucción.

El elevado número de datos y aspectos a considerar hace que raramente se realicen estudios de ACV que incluyan el análisis completo de una carretera. Normalmente, suelen dividirse en las diferentes partes que la componen: firme, explanada, terreno portante, etc.

El Análisis del Ciclo de Vida de un Firme (ACVF) representa un trabajo más sencillo que el ACV de una carretera, puesto que el firme es un componente o subconjunto de ésta. El aislamiento del firme permite enfocar mejor el análisis, a la vez que facilita que se generen recomendaciones específicas sobre éstos, para lograr un enfoque global medioambiental de la carretera en su totalidad (Perelli, M., 2018).

A pesar de ello, un ACVF es una herramienta compleja, que debe ser estructurada en diferentes fases o etapas claramente detalladas, que incluyan todas las consideraciones e hipótesis aplicadas durante el desarrollo del estudio.

A lo largo de las siguientes páginas, se describe la metodología a seguir para la realización completa de un estudio medioambiental para el caso de los firmes, con el objetivo introducir nuevos criterios en la etapa de diseño para la definición de estrategias de mejora ambiental.

### 3.2. Unidad funcional

La Unidad Funcional (UF) debe ser la unidad de referencia a partir de la cual se normalizarán todos los datos de entrada y salida del sistema (Norma UNE-EN ISO 14040). Si particularizamos para el caso del sector de la construcción, según la Norma UNE-EN 15804:2012+A1:2014, la UF debe permitir normalizar los resultados del ACV de los flujos materiales (*inputs* y *outputs*) del producto de construcción, para obtener datos expresados mediante una base común.

Para el caso de las obras de ingeniería civil, la unidad funcional debe definir como mínimo (Perelli, M., 2018):

- El tipo de obra o infraestructura (en el caso de este estudio, el tipo de carretera dónde se emplea el firme).
- El tráfico esperado.
- La vida útil u horizonte temporal previsto en el estudio.

En relación al último de los puntos, el horizonte temporal del estudio está ligado a la durabilidad del firme. Tal y como se comenta más adelante (*puntos 3.3.2.4. Fase de mantenimiento y rehabilitación y 3.3.2.5. Fase de fin de vida*), la vida útil de un firme depende enormemente de las actuaciones de mantenimiento que se realicen en él.

Si se observan los estudios realizados hasta el momento, se encuentran períodos de análisis que van desde los 20 hasta los 100 años, escogiendo para la mayoría de los casos valores de 30 u 50 años. El establecimiento del horizonte temporal puede no ser necesario en el caso que el ACV sea del tipo “de la cuna a la puerta” (*cradle to gate*) al no considerar las etapas de uso, rehabilitación y fin de vida.

En resumen, la correcta elección y definición de la unidad funcional es un elemento clave para el ACVF. Todos los datos se deben referenciar a la misma UF para que sea posible agregarlos y con ello obtener unos resultados coherentes. Además, si el objetivo del ACVF es la comparación entre diferentes estudios, la unidad funcional debe compartir como mínimo el mismo nivel de tráfico y el horizonte temporal o periodo de estudio.

### 3.3. Etapas del ACVF

La herramienta del ACVF no deja de ser un caso particular de ACV, por lo tanto, las etapas que deben definirse son, a grandes rasgos, las mismas que han sido detalladas en el punto 2.5. *Etapas del ACV*. En este apartado, se describen las consideraciones a tener en cuenta para el caso de los firms de carreteras.

#### 3.3.1. Definición del objetivo, alcance y límites del sistema

El principal objetivo de un ACVF es la definición de un modelo que permita comparar diferentes alternativas de construcción de firms para carreteras, escogiendo aquellas que presenten mayores ventajas medioambientales.

También se pretende identificar aquellas fases y procesos de la vida útil de un firme más susceptibles a mejoras, desde el punto de vista de la eficiencia energética y ambiental, pudiendo así proponer los cambios necesarios (Sampedro, A., 2011).

El alcance y límites del sistema dependerán de las fases que se decida incluir en el análisis. Cuanto mayor sea el número de etapas consideradas, mejor será la precisión del estudio, pero mayor su grado de complejidad. Analizando la bibliografía disponible, se ha observado que dependiendo de la metodología escogida, las fases consideradas son unas u otras. De hecho, existen pocos estudios que incluyan la totalidad de los procesos de la vida útil de un firme. No obstante, las fases de la vida de un firme no difieren de forma sustancial unas de otras (Perelli, M., 2018). Cuando se defina la fase de inventario en el siguiente apartado (*punto 3.3.2. Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV)*) se detallará cuáles son las actividades que se incluyen en cada una de ellas.

### 3.3.2. Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

Tras la definición de los límites del sistema, el siguiente paso consiste en realizar un balance de todas las entradas y salidas. Las principales entradas o *inputs* son los recursos energéticos utilizados (es decir, los combustibles) y los recursos materiales (básicamente áridos, fíller y betún). Las salidas u *outputs* del sistema serán las emisiones y los residuos generados en los procesos.

Como se ha dicho, el sistema de una carretera puede dividirse en una serie de subsistemas o procesos que deben ser analizados individualmente. Estos procesos son los necesarios para la puesta en servicio, el funcionamiento de la infraestructura en perfectas condiciones y, finalmente, su demolición y retirada tras su vida útil (Sampedro, A., 2011).

El esquema de la figura (Figura 12) muestra los procesos, con sus respectivos subprocesos, incluidos en el ciclo de vida de cualquier tipo de firme. Estas etapas son las mismas que las que dicta la Norma UNE-EN 15804:2012+A1:2014 para el CV en la evaluación de edificios.

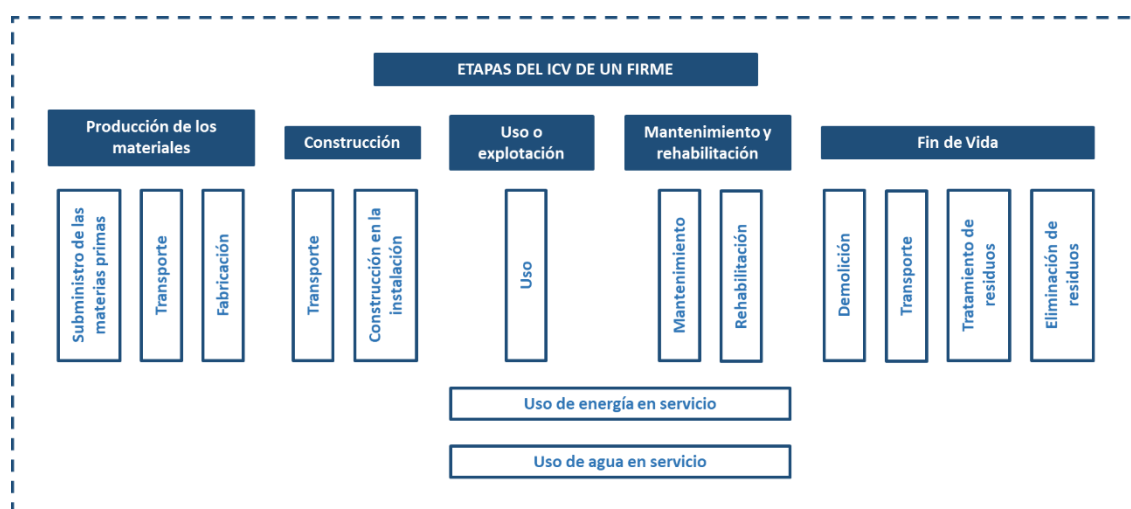


Figura 12 Etapas del inventario del ciclo de vida de un firme. Fuente: Elaboración propia.

### **3.3.2.1. Fase de producción de los materiales**

Esta primera fase debe incluir todos los procesos necesarios para la fabricación del firme. En primer lugar, deben considerarse los subprocesos de obtención de las materias primas. La extracción y procesamiento de los áridos, con la maquinaria e instalaciones necesarias (retroexcavadoras, cintas transportadoras, palas, sistemas de cribas, etc.). La extracción y procesamiento de los filleres, variando si éstos son de recuperación o aportación (estos últimos con un mayor impacto al tener que cuantificarse los consumos y las emisiones de su fabricación y transporte hasta la planta). Finalmente, la extracción y procesamiento del betún asfáltico, puesto que el proceso de refinado de hidrocarburos genera un gran impacto ambiental por sus emisiones de CO<sub>2</sub>.

A continuación, deben contabilizarse los *inputs* necesarios para la transformación de los materiales en el producto, es decir, los subprocesos de mezcla que tienen lugar en las plantas. Por último, debe considerarse el transporte de las materias primas o productos acabados entre procesos.

Como se espera de todo ACV, los datos de inventario también deben incluir todos los procesos que hay detrás de la producción de la energía que se utiliza para la obtención de los materiales.

### **3.3.2.2. Fase de construcción**

La fase de construcción considera todos los subprocesos necesarios para la construcción del firme. Se incluyen en esta etapa la movilización y desmovilización de la maquinaria y los equipos y su uso en lugar de la obra. La energía utilizada, como por ejemplo, la iluminación durante los trabajos nocturnos de construcción, los cambios en el tráfico debido a los desvíos y las obras, etc. En algunos casos, pueden incluso incluirse los trabajos relativos a los movimientos de tierras.

### **3.3.2.3. Fase de uso o explotación**

Durante esta etapa es necesario contabilizar el impacto que produce el tráfico rodado sobre el horizonte temporal que se considere en el estudio. Algunos estudios más completos llegan incluso a contabilizar el impacto asociado a la iluminación de la infraestructura, la congestiones, etc.

En la figura (*Figura 13*) se muestra de manera esquemática como, dependiendo de las características del pavimento, se producen una serie de impactos durante el uso de la carretera (*Harvey, J. et al., 2014*).

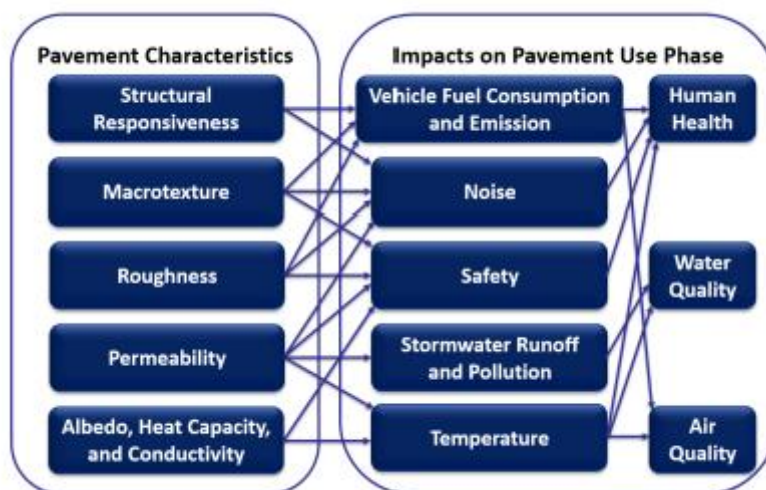


Figura 13 Etapas del CV de un firme. Fuente: Harvey, J. et al., 2014.

- La rugosidad, la macrotextura y la respuesta estructural afectan directamente al consumo de combustible de los vehículos que circulan, generando un impacto ambiental sobre la salud humana y emisiones al aire.
- La textura y permeabilidad influyen en el ruido que se genera, resultado del contacto rueda-pavimento. Esto produce un impacto sobre los propios usuarios del vehículo y las personas próximas al lugar.
- La textura y permeabilidad también afectan directamente a la fricción entre el neumático y la carretera, pudiendo generar *hydroplaning* y comprometer la seguridad.
- El albedo, la capacidad calorífica y la conductividad térmica del pavimento pueden afectar directamente a la absorción de la energía de la luz solar y a la emisión de energía térmica por parte del pavimento. Esto puede producir un mayor consumo de energía al incrementar el uso de los sistemas de refrigeración de los vehículos. Además, el albedo puede tener un impacto en la energía necesaria para iluminar la carretera durante la noche.

Muchos de los efectos que se han considerado en los puntos anteriores son muy difíciles de contabilizar, debido su elevado grado de incertidumbre. Es por este motivo que apenas han sido considerados en los ACVF realizados hasta el momento.

#### 3.3.2.4. Fase de mantenimiento y rehabilitación

La fase de mantenimiento y rehabilitación incluye todas esas actividades realizadas a lo largo de la vida útil de la carretera con el objetivo de mantenerla en un correcto estado de conservación. El tipo de actividad y su frecuencia puede ser muy variado, encontrando desde pequeños trabajos de conservación ejecutados regularmente, a actuaciones de reconstrucción mucho mayores y escaladas en el tiempo.

En el caso de las secciones de firms, las actuaciones a realizar pueden agruparse en dos tipos (*Moral, A., 2016*):

- Operaciones de mantenimiento o conservación ordinaria: son aquellas actuaciones que pretenden retrasar la degradación de las características funcionales o estructurales de la carretera. Habitualmente se llevan a cabo con maquinaria ligera, siendo algunas de las más destacadas: la reparación de fisuras, el riego de sellado, aplicación de lechadas, reparación de blandones, el fresado localizado, etc.
- Operaciones de rehabilitación o conservación relevante (extraordinarias): son aquellas actuaciones que pretenden llevar a su estado inicial los elementos de la carretera que han llegado al fin de su vida útil o lo harán próximamente.

El tipo de trabajos o la frecuencia con la que se realizan depende muchos factores. Por ejemplo, cómo ha sido diseñado y construido el firme, la intensidad de tráfico a la que está sometido, las condiciones climáticas, etc.

Para que el estudio del ACVF sea lo más preciso posible, las operaciones de mantenimiento deben fijarse previamente durante la fase de proyecto, cuando se conocen todos los condicionantes que afectaran a ese firme en particular. No obstante, si se realiza un análisis de un firme genérico se puede definir un plan de mantenimiento estándar. Este último será menos preciso que el anterior pero aportará información útil para la toma de decisiones (*Perelli, M., 2018*).

#### **3.3.2.5. Fase de fin de vida**

Gracias a las operaciones de mantenimiento comentadas en el punto anterior, la vida útil de las carreteras suele prolongarse en el tiempo, haciendo que rara vez se llegue al fin de su vida. Es más, son muy poco frecuentes los casos en los que una carretera se cierra al tráfico, puesto que cuando se sustituyen por vías nuevas, las carreteras viejas suelen pasar a ser caminos rurales o vías para ciclistas.

Esta fase ha sido pocas veces considerada en los estudios disponibles hasta el momento, únicamente en un 25% de ellos. Sin embargo, en el caso de querer añadir la fase de fin de vida en el ACVF, ésta dependería de los límites del sistema establecidos previamente, pudiendo incluir la desmantelación o demolición del firme y posterior traslado a vertedero o el reciclaje de éste.

La reutilización o reciclaje de los materiales puede suponer una reducción potencial de los impactos medioambientales y, en la actualidad, es ampliamente conocido el uso de materias recicladas en la fabricación de componentes para la construcción. Por eso, sería erróneo considerar que todos los materiales se destinan a vertedero.



### 3.3.3. Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

Una vez se tienen todos los datos de la etapa anterior inventariados, se debe calcular la capacidad de afectación al medioambiente de cada uno de ellos. El procedimiento que se sigue es el mismo que para cualquier estudio de ACV, incluyendo: la selección de la metodología de análisis y de las categorías de impacto, la clasificación, la caracterización y, opcionalmente, la normalización, agrupación, ponderación y el análisis de calidad de los datos.

Gracias a los resultados que se obtengan en esta etapa será posible decidir cuáles son los principales impactos ambientales, realizar comparativas entre diferentes secciones de firmes u observar como varían los resultados en función de los diferentes condicionantes (por ejemplo, una misma sección de firme sometida a diferentes categorías de tráfico) (*Moral, A., 2016*).

### 3.3.4. Interpretación de los resultados

Esta fase tampoco dista demasiado de cualquier otro trabajo de ACV, extrayéndose todos los resultados fruto de los dos puntos anteriores, el análisis y la evaluación del inventario. Los resultados deben presentarse en consonancia al objetivo y alcances definidos al principio de todo.

En este punto se deben presentar los resultados en función de las categorías de impacto y de los indicadores ambientales seleccionados, obteniendo cuáles son aquellas que generan un mayor impacto.

La presentación de los resultados debe hacerse utilizando un gran soporte visual (gráficos de sectores, de barras, etc.) para facilitar la comprensión. Para ello, se debe desarrollar un *software* muy intuitivo, fácil de manejar y con una salida de datos muy gráfica (*Sampedro, A., 2011*).

Además, gracias a los resultados, se obtienen las conclusiones para la elaboración de informes, donde puedan especificarse posibles mejoras para el firme objeto de estudio. Dependiendo del público al que se dirijan, estos informes pueden ser más generales o detallados, estos últimos cuando sean para técnicos o especialistas.

## 3.4. Limitaciones del ACVF

A lo largo de este capítulo y del anterior, se han ido comentando las numerosas ventajas que presenta la herramienta del ACV, tanto para casos generales como particularizando para los firmes. Sin embargo, tal y como se ha encargado de recoger el CEDEX en su monografía (*Perelli, M., 2018*), los ACVF también presentan una serie de limitaciones.

En primer lugar, destaca la inconsistencia entre las unidades funcionales de los diferentes estudios. Además, muchos de ellos también tienen diferentes límites de sistemas, resultando algunos inadecuados.

En segundo lugar, existe un grado de incertidumbre asociado a los datos de entrada utilizados. La mayoría provienen de bases de datos distintas, cosa que complica posibles comparaciones. También hay un grado de incertidumbre asociado a las metodologías en sí, puesto que la

evaluación de impactos es, en muchos casos, un proceso subjetivo. De hecho, los inventarios que se utilizan y las categorías de impacto son limitados y en numerosos casos diferentes.

En tercer lugar y al igual que en la mayoría de ACVs, no se consideran ni la escala temporal ni la geográfica durante la suma de los flujos. Éstos se evalúan sin tener en consideración dónde ni cuándo se producen. Además, muchas metodologías también suponen una relación lineal entre los impactos y las cantidades de contaminantes que se liberan.

El coste de cualquier ACVF, tanto de tiempo como de dinero, también supone una limitación. Al existir un número limitado de metodologías y procedimientos, la ejecución de las diferentes etapas se traduce en un proceso laborioso que suele alargarse en el tiempo.

Por último, de los tres pilares para la sostenibilidad, siguen sin considerarse el económico y el social, prestando únicamente atención al ambiental. Si bien es preciso mencionar que algunas de las herramientas disponibles incluyen la posibilidad de realizar análisis de costes, tal y como se comentará en el *Capítulo 5. Herramientas informáticas*.

Con el objetivo de que estas limitaciones afecten en la menor medida a los estudios, es recomendable considerar la totalidad de las etapas del ciclo de vida, utilizar unos datos de entrada de calidad, elaborar unas bases de datos que sean fiables y de carácter internacional, realizar una validación de las metodologías y utilizar un abanico suficientemente amplio de impactos, no solamente las emisiones y los gases de efecto invernadero (*Perelli, M., 2018*).

## Capítulo 4

### METODOLOGÍAS DE ACVF

El presente capítulo pretende hacer una recopilación de los principales proyectos en materia de ACVF que se han llevado a cabo, tanto a nivel europeo como a nivel nacional, en los últimos años. Se han seleccionado aquellos estudios que presentaban un mayor interés para este trabajo, detallando los trabajos españoles por su componente geográfica.

Para todos y cada uno de ellos, se hace una breve descripción, a modo de resumen, de los principales objetivos, etapas consideradas, así como el sistema de recogida y análisis de datos. Además, se detalla el procedimiento seguido para la realización del ACV y los principales resultados y conclusiones obtenidas tras su finalización.

#### 4.1. Principales metodologías europeas

Tal y como se ha mencionado en varias ocasiones, a nivel europeo se ha realizado un minucioso trabajo para la estandarización de la metodología a seguir en los ACV, mediante las Normas ISO 14040 y 14044. Por otro lado, se dispone de diferentes bases de datos muy completas con las que trabajar y que son actualizadas periódicamente (algunas de ellas comentadas en el *punto 2.5.2. Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV)*).

Este interés por el uso del ACV como herramienta de evaluación ambiental, ha hecho que sea Europa la cuna del nacimiento de los estudios de ciclo de vida aplicados al sector de las infraestructuras viarias.

En este punto, se describen las principales iniciativas de instituciones europeas que se han llevado a cabo para poder evaluar la sostenibilidad y definir mejoras energéticas para el caso de las carreteras, particularmente de los firmes.

##### 4.1.1. ECRPD

###### Descripción general

ECRPD (*Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation*) es un proyecto que duró 3 años, iniciándose a principios de 2007 y acabando a finales de 2010. Se basa en los resultados previamente obtenidos en el proyecto *IERD (Integration of Energy into Road Design)* y fue financiado por la Comisión Europea junto con el *Waterford Country Council* (Irlanda), además de otros socios de diferentes países europeos.



El proyecto *IERD*, completado en 2006, se encargó de evaluar la energía necesaria para la construcción, incluyendo la producción de los materiales, y el uso de una carretera, en un período de 20 años. Para ello, se utiliza el *software JouleSAVE* que permite la comparación en términos de energía de diferentes tipos de carreteras.

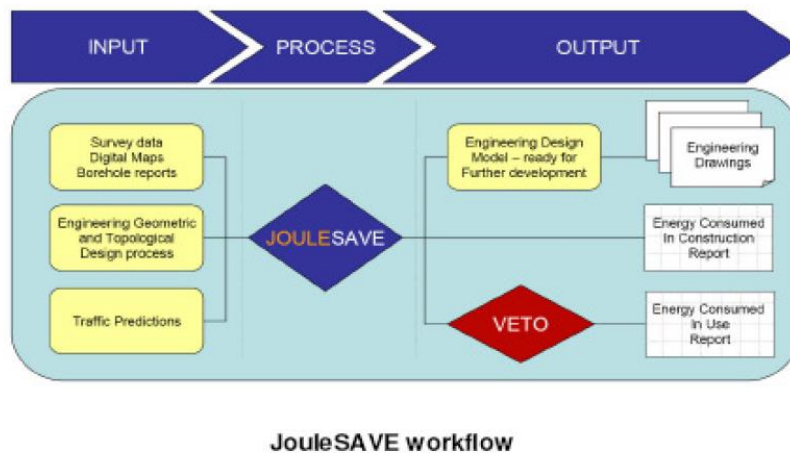
El proyecto *ECRPD*, además de la evaluación energética en las fases de construcción y uso, incorpora la fase de mantenimiento. Se estudian varios tipos de firme, localizados en los países colaboradores, algunos de ellos contruidos con materiales de «bajo consumo energético», en cuatro tramos diferentes: autopista, autovía y dos tipos de vías convencionales (*Perelli, M., 2018*).

La herramienta utilizada es el *software JouleSAVE 2*, una versión mejorada del anterior. Esta última versión permite evaluar la energía necesaria para construir y realizar los trabajos de mantenimiento en una carretera, además de la energía que utilizan los vehículos que circulan en ella, considerando el deterioro de la infraestructura y la resistencia a la rodadura a medida que éste avanza (*ECRPD, 2010*).

El objetivo principal de los ACVs realizados es la comparación del impacto ambiental en la construcción de diferentes tipos de carreteras asfálticas y su mantenimiento a lo largo de su vida útil, considerando la extracción de los materiales y la producción de las mezclas en plantas.

#### **Funcionamiento de la herramienta**

El *software JouleSAVE* permite el cálculo de la energía utilizada en la construcción y mantenimiento de una carretera y de la energía consumida por los vehículos que circulan en ella, para un período temporal de 20 años. En la siguiente figura (*Figura 14*), se muestran los flujos de entradas y salidas con los que trabaja dicha herramienta.



*Figura 14 Flujos del sistema en JouleSAVE. Fuente: ECRPD, 2010.*

Entre las variables de entrada deben definirse las predicciones de tráfico. Por un lado, es necesario indicar el volumen estimado de vehículos, pudiéndolos clasificar entre ligeros, pesados y pesados con tráiler. Por otro lado, es posible especificar la dirección del tráfico, así como condiciones meteorológicas, el tipo de superficie o incluso la tasa de crecimiento anual del tráfico (*Figura 15*).

Figura 15 Inputs sobre el tráfico. Fuente: ECRPD, 2010.

El siguiente paso consiste en introducir los *inputs* relacionados con el diseño de las capas del pavimento. Para ello, existe una base de datos con los principales materiales utilizados en pavimentación, permitiendo la incorporación de nuevas entradas. Para los distintos materiales se dispone de la energía necesaria para su producción y disposición en obra. Finalmente, deben introducirse en el programa los tipos de materiales junto con los espesores de cada una de las capas (Figura 16).

Layer	Code	Description	Cost	Cost Unit	Tonnage Factor
00					
01	SURFACE001	Wearing Course / Surface --- Dense Macadam Surface Cl. 909	0.00	Tonne	0.0
02	BINDER001	Base Course / Binder --- Dense Macadam Binder Cl. 906	0.00	Tonne	0.0
03	BASE001	Road Base / Regulating Material --- Dense Macadam Base Cl. 903	0.00	Tonne	0.0
04					
05					

Figura 16 Inputs sobre las capas del pavimento. Fuente: ECRPD, 2010.

Por último, se introducen los datos referentes al tipo de explanada. El programa dispone de tres tipos de materiales:

- Tipo A: materiales fácilmente excavables mediante la maquinaria habitual.
- Tipo B: materiales más duros que requieren de un mayor esfuerzo que el grupo anterior.
- Tipo C: materiales muy duros que precisan del uso de explosivos.

Una vez todos los parámetros de entrada han sido introducidos, completando el diseño de la carretera, se calculan las cantidades de energía para la construcción y operación, proporcionando los TJ/km en el horizonte temporal de estudio (20 años) (Figura 17).

Road & Route Option	Road Type	Total Vehicle Energy for Road Project 2010-2029 TJ	Total Route Length (km)	Total Vehicle Energy Per Kilometre 2010-2029 TJ/km
General Country	Single Carriageway	19454.463	0.464	41922.889

Vehicles	Energy TJ/km	Road Construction	Energy TJ/km
Total for all	41922.889	Total for all	2.534
Average for all	41922.889	Average for all	2.534

Figura 17 Energía en las fases de construcción y operación. Fuente: ECRPD, 2010.

### Principales resultados

Los principales resultados y conclusiones fruto de este proyecto son los que se listan a continuación:

- El *software* descrito en el punto anterior para el cálculo del consumo energético.
- La posibilidad de reducir la energía utilizada en la vida útil de una carretera, especialmente si se utilizan materiales con «bajo consumo energético». Gracias a *JouleSAVE 2* se puede reducir en un 47% la energía en la fase de construcción, en un 20% en la fase de operación y en un 30% en la de mantenimiento, evaluando las contribuciones energéticas en las diferentes etapas del sistema.
- El interés creciente por parte de las Administraciones y entidades privadas en la reducción del consumo energético.
- El hecho de que el uso de los materiales con «bajo consumo energético» está creciendo en popularidad.

Sin embargo, durante la duración del proyecto se encontraron con algunas limitaciones como la incertidumbre asociada a los datos. Esto se debe a la dificultad de establecer un inventario con los diferentes procesos de construcción y operación de una carretera puesto que dependen de múltiples factores (Perelli, M., 2018).

#### 4.1.2. LCE4ROADS

##### Descripción general

*LCE4ROADS* es un proyecto de 36 meses de duración que se inició el 1 de octubre de 2013. Fue financiado por la Comisión Europea bajo el título “*Life Cycle Engineering approach to develop a novel EU-harmonized sustainability system for cost-effective, safer and greener road infrastructures*” (*lce4roads.eu*, 2019).



Este proyecto nace de la necesidad de crear un sistema para la certificación de productos sostenibles relacionados con el mundo de las infraestructuras viarias, que además integre una metodología de Ingeniería del Ciclo de Vida (*LCE- Life Cycle Engineering approach*), cubriendo el CV completo y todos los pilares sostenibles. Es decir, que permita asesorar sobre indicadores medioambientales, así como aspectos económicos, técnicos y sociales.

Se trata de una metodología que permite evaluar la sostenibilidad de las carreteras existentes, mediante planes de mantenimiento y rehabilitación, y de proyectos de construcción futuros. También permite la evaluación de diferentes tipos de firmes, como por ejemplo firmes asfálticos o rígidos (*Perelli, M., 2018*).

Éste es un proyecto coordinado por ACCIONA Infraestructuras que cuenta con la participación de numerosas empresas e instituciones europeas, algunas de ellas españolas (como UNE, que era AENOR en ese momento, IECA y CIRCE, además de ACCIONA).

##### Plan de trabajo del proyecto

Para conseguir los resultados deseados se diseña un plan de trabajo completo. Este plan se estructura en 8 partes denominadas planes de trabajo (*WPs- Work Packages*) (*lce4roads.eu*, 2019):

- *WP 1: SETTING THE SCENE: Labelling approaches and Key Performance Indicators.*

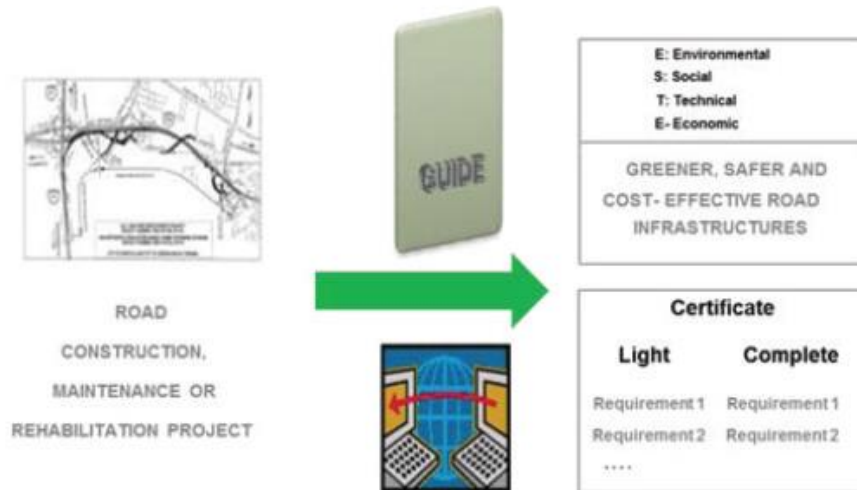
Este paquete pretende establecer las bases de la metodología *LCE4ROADS*. Para ello se evalúan los enfoques disponibles para el etiquetado aplicado a los campos del diseño de carreteras, construcción, mantenimiento y rehabilitación, así como los materiales utilizados para la construcción, además de las legislaciones y estándares vigentes.

Se seleccionan los indicadores para las carreteras que cubren los principales aspectos ambientales, técnicos, sociales y económicos, y se definen nuevos aspectos como la resiliencia al cambio climático. También se seleccionan indicadores para mezclas asfálticas, incluyendo las de tipo semicaliente, y materiales de pavimentación con base de cemento.

Con el objetivo de verificar si los indicadores seleccionados son los adecuados, se realiza un ejercicio teórico basado en una evaluación comparativa (*benchmarking*) de los principales tipos de estructuras con los indicadores propuestos.

- WP 2: Sustainability certification methodology for road products and infrastructures.

El segundo paquete se basa en la definición de una metodología para crear un sistema de certificación sostenible para las infraestructuras viarias. Este sistema debe cubrir la totalidad de los criterios sostenibles, junto con aquellos nuevos identificados en el *WP 1*, convirtiéndose en la base de las guías *LCE4ROADS* y que luego se implantará en la herramienta informática (*Figura 18*).



*Figura 18 Concepto de la metodología LCE4ROADS. Fuente: Fernández, R. et al., 2016.*

Esta metodología de certificación sigue las normativas ISO 14040 e ISO 14044 y la EN 15804 y se basa en tres pasos:

- La etapa de planificación y diseño.
  - La etapa de construcción, donde se verifica el cumplimiento de todo lo definido en el proyecto.
  - La fase de operación, donde se comprueba el comportamiento real.
- WP 3: Assessment against the LCE4ROADS methodology of road products and infrastructures.

El tercer paquete consiste en la evaluación mediante la metodología *LCE4ROADS* de productos o procesos utilizados en las carreteras, incluyendo la construcción, mantenimiento, rehabilitación y operación.

Se evalúan diferentes tipos de pavimentos (asfálticos y rígidos) junto con otros materiales como betunes, áridos o aditivos e incluso materiales reciclados como el RAP (*Recycled Asphalt Pavement*). En los estudios se presta especial atención a la cuantificación de la energía usada para la fabricación de los firmes en las plantas asfálticas, especialmente en las de mezcla caliente.

Todo ello permite la definición de recomendaciones para obtener la puntuación necesaria para la obtención de *ecoetiquetas* (*EU Ecolabel*) para los productos o procesos del sector de las infraestructuras viarias.



- WP 4: Development of the LCE4ROADS software tool.

El principal objetivo del cuarto paquete de trabajo es el desarrollo de un *software* basado en la metodología *LCE4ROADS* y que incluya los indicadores seleccionados previamente. Esta herramienta busca facilitar la implementación de la metodología en todos los estados miembros de la UE para poder asignar las *ecoetiquetas*, además de proporcionar recomendaciones para que las carreteras sean más sostenibles.

- WP 5: Validation of the LCE4ROADS methodology and the associated software tool.

En el quinto paquete se valida la herramienta informática con la metodología asociada, utilizando datos de casos reales proporcionados por las Administraciones. Se analizan diferentes proyectos viales, evaluando su sostenibilidad con *LCE4ROADS*, y se proporcionan las recomendaciones en innovación, tecnologías más verdes y económicas y comportamientos a largo plazo, sugeridas por el *software*. También se evalúan los proyectos analizados en el *WP 1*, que ya han sido ejecutados, para comparar los datos reales con las salidas del *software*.

- WP 6: LCE4ROADS guide and implementation strategies.

En el sexto paquete se desarrollan las guías *LCE4ROADS* que incluyen:

- La implementación del sistema de certificación.
- El procedimiento a seguir para la obtención del certificado *LCE4ROADS*, basado en la metodología y el *software* definidos.
- La definición de las estrategias de implementación más adecuadas para la aceptación en el mercado

- WP 7: Communication, dissemination, standardisation and exploitation.

Mediante el séptimo paquete se pretende dar a conocer los resultados del proyecto. Esto se consigue mediante:

- La creación de un Plan de Concienciación y Difusión de los resultados del proyecto.
- La realización de investigaciones pre-normativas hacia la estandarización.
- El desarrollo de un plan de explotación para los resultados del proyecto.

- WP 8: Administrative Management.

En el octavo y último paquete de trabajo, se coordinan actividades entre la Comisión Europea y los socios de *LCE4ROADS*, estableciendo comunicaciones y métodos para poder informar, monitorear los progresos y garantizar la calidad del método.

### **Principales resultados**

Tras el periodo de duración del proyecto y después de distintas actividades de investigación a nivel europeo, los principales resultados extraídos son (*cordis.europa.eu*, 2019):

- Una metodología para la evaluación del desarrollo de la sostenibilidad en proyectos viales.

- Una herramienta de *software* basada en esta metodología que facilita la evaluación de proyectos viales de acuerdo a los principios de *LCE4ROADS*.
- Un conjunto de directrices, junto con recomendaciones, para poder implantar estrategias con el objetivo de construir carreteras más sostenibles, seguras y rentables (*Guía de certificación LCE4ROADS*).
- El propio sistema de certificación.

#### 4.1.3. Re-Road

##### Descripción general

*Re-Road* es un proyecto que tuvo lugar entre enero de 2009 y diciembre de 2012, formando parte del *VII Programa Marco* de la Unión Europea. En él participan numerosos organismos, instituciones o centros, como la Universidad de Dresden o Nottingham, de diferentes países europeos.



Su principal objetivo es el desarrollo de conocimientos y tecnologías innovadoras, para mejorar las estrategias de fin de vida de las carreteras asfálticas. Dichas estrategias tienen un impacto directo en la eficiencia energética y en la huella ambiental del sistema de transporte europeo, y deben basarse en la reducción del uso de materias primas, promoviendo los materiales reciclados (*re-road.fehrl.org*, 2019).

Para la determinación de una estrategia de fin de vida se cubren los siguientes temas:

- Estrategias de desmantelamiento: evaluando el impacto y el potencial efecto adverso de diferentes procedimientos de desmantelamiento en la calidad de las mezclas recicladas.
- Estrategias de caracterización: mejorando la caracterización y las técnicas de evaluación de las mezclas recicladas como materia prima, considerando la heterogeneidad del material y el proceso industrial específico para producirlas.
- Estrategias de gestión: optimización del reciclaje y modos de eliminación de aquellas materias marginales que no es posible reciclar. Uso de la técnica del ACV para determinar aquellos materiales con un mayor impacto ambiental asociado.
- Criterios ambientales: evaluación ambiental del uso de mezclas recicladas.
- Estrategias para la viabilidad económica del reciclaje. Predicciones a corto y largo plazo de la vida útil de la carretera construida con diferentes porcentajes de mezclas recicladas y técnicas de producción.
- Procesos industriales: estudio del efecto del método de producción en planta sobre la calidad de las mezclas con material reciclado.

En lo que al ACV se refiere, se realiza un estudio incluyendo las fases de construcción, mantenimiento o rehabilitación, uso y fin de vida, considerando como unidad funcional la tonelada de asfalto.

### **Plan de trabajo del proyecto**

Para alcanzar los objetivos del proyecto, se ejecuta un plan de trabajo dividido en seis paquetes complementarios (*WPs- Work Packages*) (*re-road.fehrl.org, 2019*).

- *WP 1: Sampling and Characterization of RA.*

El principal objetivo de este paquete es el desarrollo de un procedimiento de muestreo para poder caracterizar adecuadamente las mezclas recicladas, pudiendo así estudiar su potencial de uso.

Se pretende averiguar si es posible el uso de cantidades mayores de materiales recuperados, consiguiendo reducir el consumo de áridos naturales y la generación de residuos.

Dentro del paquete se realizan las siguientes actividades:

- Muestro de mezclas recicladas.
  - Mejora de la caracterización de las mezclas recicladas, especialmente de aquellas que contienen betunes modificados con polímeros.
  - Caracterización ambiental.
- *WP 2: Impact of RA quality and characteristics on mix design and performance of asphalt containing RA.*

Este paquete pretende analizar el potencial de los materiales reciclados en las nuevas mezclas asfálticas con ligantes modificados. Se examina si éstos son compatibles con los betunes antiguos de las mezclas recicladas.

Se desarrollan pautas de diseño con el objetivo de garantizar que las mezclas que contienen asfaltos reciclados tienen suficiente vida útil.

Las actividades ejecutadas son:

- Evaluación de la compatibilidad de las mezclas recicladas con los nuevos ligantes (convencionales y modificados).
  - Evaluación del impacto de las mezclas recicladas en el diseño de la mezcla y en su comportamiento en el laboratorio.
  - Validación de campo.
- *WP 3: Environmental performance of RA.*

El tercer paquete pretende el desarrollo y mejora de las herramientas disponibles para la caracterización ambiental sobre el uso de mezclas recicladas. Dicha evaluación debe extenderse a lo largo de todo el ciclo de vida, incluyendo: la producción de las mezclas recicladas, su procesado, la introducción de dichos materiales en las plantas, su uso y, finalmente, otra vez su reciclado.

Las tareas realizadas son:

- Evaluación de los riesgos de las mezclas recicladas.
- Evaluación del ciclo de vida de las mezclas recicladas.

- WP 4: RA processing and RA management at the mixing plant.

El cuarto paquete se basa en definir el uso óptimo de los niveles de material reciclado, es decir, trabajar con el nivel más alto posible de mezclas recicladas para así preservar al máximo los recursos naturales.

En este paquete se hace lo siguiente:

- Producción de mezclas recicladas.
- Evaluación del comportamiento de las mezclas recicladas.
- Introducción de las mezclas recicladas en los procesos de mezclado.

- WP 5: Performance modelling of RA.

El quinto paquete pretende modelar el comportamiento de las mezclas recicladas, evaluando su deterioro, y estudiar la vida útil de estos pavimentos. Se pretende desarrollar una herramienta de modelización numérica basada en el método de los Elementos Finitos (EF).

De las simulaciones numéricas se pueden extraer las tensiones, desplazamientos y deformaciones en la carretera, determinando su capacidad portante. Con los resultados es posible diseñar los pavimentos de un modo más preciso.

Los pasos para lograr estos objetivos son:

- Determinar las variables de entrada para la herramienta numérica mediante pruebas de laboratorio.
- Predecir la vida útil y proceso de deterioro de los materiales reciclados.
- Introducir las mezclas recicladas en el proceso de diseño.

- WP 6: Dissemination, clustering and coordination.

En el último paquete se difunden y explotan los resultados obtenidos a lo largo del proyecto. Además, se redacta el informe final con los resultados, explicado a continuación. Se diseña la página web y, por último, se realizan varios seminarios y conferencias acerca del tema.

**Principales resultados**

A través del plan de trabajo mencionado se pretende considerar los aspectos principales de trabajar con mezclas recicladas: los procesos de recuperación, el diseño de las mezclas, el mezclado en planta o su comportamiento en obra. Además, es necesario entender los beneficios ambientales del uso de materiales recuperados.

El proyecto analiza el comportamiento de distintas mezclas con diferentes niveles de material reciclado, con o sin betunes modificados con polímeros, y reciclado en caliente *in situ*. Los resultados demuestran que para proporciones de entre 23-30% de mezclas recicladas mezclados en planta, el comportamiento a medio y largo plazo de las mezclas es comparable al de aquellas sin materiales reciclados. Adicionalmente, el uso de betunes modificados con polímeros no presenta ningún efecto adverso en el proceso de mezcla o puesta en obra, ni posteriormente durante el servicio.

Referente al reciclado *in situ*, se estudian más de 300 km de carretera en Suecia, demostrando que el uso de material reciclado no afecta negativamente al comportamiento de los pavimentos. De hecho, se demuestra que el reciclado *in situ* es efectivo para mejorar la calidad de la conducción. El reciclado *in situ* puede ser aplicado en numerosas ocasiones, pero siempre con los métodos de control necesarios para garantizar que su comportamiento es comparable al de mezclas sin reciclar (Björn Kalmar et al., 2013).

En cuanto a los resultados del impacto ambiental se obtiene que el uso de mezclas recicladas supone una reducción en las principales categorías de impacto analizadas. En el *punto 3.3 Results obtained in task group for life cycle assessment of RA* del informe final del proyecto (Björn Kalmar et al., 2013), se encuentran todos los gráficos que comparan los resultados utilizando mezclas con materiales vírgenes y con diferentes porcentajes de mezclas recicladas.

## 4.2. Principales metodologías españolas

A nivel español, se dispone de diferentes proyectos de investigación sobre el ACVF. Por una parte, destaca el programa AVACo, elaborado por la empresa Sorigué, que compara las secciones de firme de la Norma 6.1-IC. Por otra parte, encontramos el Proyecto Fénix que engloba diferentes trabajos basados en la metodología del ACV.

Más recientemente, resultan muy interesantes las tesis doctorales “*Análisis de Ciclo de Vida del empleo de Altas Tasas de reciclado en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente*” (Sampedro, A., 2016) y “*La herramienta ambiental análisis del ciclo de vida en el estudio de secciones de firme. Evaluación ambiental de varias secciones de firme de categoría de tráfico T00 a T2 conforme a la Norma 6.1-IC*” (Moral, A., 2016).

Finalmente, también destaca por su interés el proyecto LIFESURE, con el objetivo de definir metodologías para la fabricación de mezclas bituminosas templadas recicladas de un modo más eficiente.

Para todo ello, la Norma EN 15804 “*Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción*” ha sido un elemento clave en la elaboración de dichos proyectos al suponer una estandarización en los estudios de ACV.

A lo largo de las siguientes páginas se explicarán detalladamente cada una de las metodologías mencionadas, su objetivo, metodología seguida o los principales resultados obtenidos.

### 4.2.1. AVACo y LCA-Abacus

#### Descripción general

Entre los años 2005 y 2010 los técnicos Jorge Ortiz Ripoll, Anna París Madrona, Cristina Moncunill Farré y Julio del Cerro Iglesias, pertenecientes a la empresa leridana Sorigué S.A., se dedicaron a evaluar el impacto ambiental de diferentes secciones de firmes de la Norma 6.1-IC mediante el uso del ACV (Perelli, M., 2018).

Este estudio se basa en la comparación de secciones de firme flexibles y rígidas, considerando también la explanada. Las etapas consideradas inicialmente en el análisis incluyen los procesos de fabricación y construcción. Se analizan los impactos producidos durante la fabricación de las mezclas en los diferentes tipos de plantas, identificando aquellos procesos menos comprometedores para el medioambiente, así como de la producción de otros materiales (zahorra artificial, hormigones, suelo-cemento, etc.). Más tarde, se completa con los procesos de transporte y puesta en obra.

Del proyecto se derivan en una serie de artículos publicados en la Revista Carreteras y en la creación de la herramienta informática AVACo, que adopta el nombre de LCA-Abacus en su versión más reciente.

### **Herramienta informática**

El *software Asistente para la Valoración Ambiental de Construcciones (AVACo)*, desarrollado por Sorigué, se basa en un formato *Excel* que permite realizar comparaciones entre los impactos medioambientales que se generan durante las etapas de fabricación y puesta en obra de los firmes.



El funcionamiento de esta herramienta, de uso privado, se describe con detalle en el artículo “*Mezclas bituminosas en caliente y análisis de ciclo de vida*” publicado en la revista *Carreteras* (Paris, A. et al., 2007). La base de datos de AVACo distingue entre la naturaleza de los áridos, el tipo de combustible que se utiliza en las plantas, su capacidad de producción o las distancias de transporte, entre otros factores.

Tal y como se ha comentado, inicialmente AVACo se fundamentaba en la elección de aquellos procesos de producción de mezclas bituminosas en caliente más respetuosos con el medio ambiente, pero con los años, se integraron los procesos de transporte y puesta en obra. Es decir, dentro del ACV se distinguen tres subsistemas: la extracción y el procesado de los áridos, las plantas asfálticas y la puesta en obra, permitiendo obtener resultados de las etapas por separado.

Para la recopilación de todos los datos necesarios, la mayoría proporcionados por la empresa Sorigué, se cuantifican todas las materias primas, los consumos energéticos (energía eléctrica y combustibles), los residuos y las emisiones atmosféricas. Estas últimas, junto con los consumos de la maquinaria y vehículos, son extraídos del *Libro de Trabajo para el inventario de Gases de Efecto Invernadero Vol. 2* del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (1997) (Paris, A. et al., 2007).

Una vez se ha completado el inventario se calcula, para cada unidad de firme terminada, los impactos asociados a lo largo de su vida útil. La herramienta AVACo proporciona como resultados los impactos relativos a las cuatro categorías siguientes:

- El consumo de los recursos no renovables (RECURSOS [kg]).
- El consumo energético (ENERGÍA [MJ]).
- El calentamiento global (EMISIONES [kg CO<sub>2</sub> eq]).
- Los residuos generados (RESIDUOS [kg]).

Para representar gráficamente las categorías, se realiza un proceso de adimensionalización, dividiendo todas las alternativas de los firmes estudiados entre aquella de menor impacto (Figura 19).

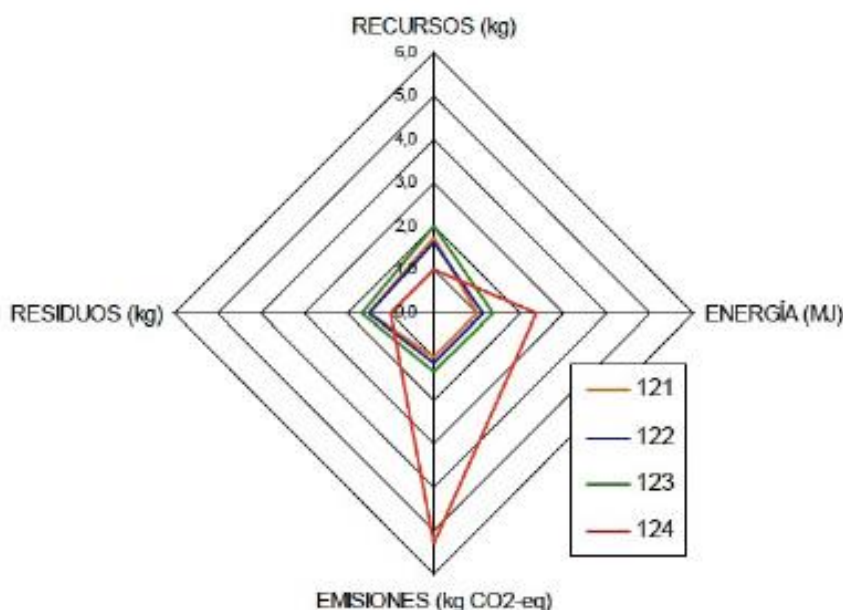


Figura 19 Representación de los resultados de las secciones de firme estudiadas en AVACo.  
Fuente: Paris, A. et al., 2006.

Finalmente, el programa pondera los cuatro indicadores de las categorías anteriores, permitiendo obtener un valor único que permita la clasificación ambiental de las secciones estudiadas, ordenándolas de más sostenibles (valor igual a 1) a menos.

### **Principales resultados**

Además del funcionamiento del programa, en el artículo (Paris, A. et al., 2007) se describen las diferentes conclusiones u objetivos conseguidos tras la finalización del proyecto. A grandes rasgos, éstos son:

- La valoración cuantitativa de la reducción de emisiones y energía al utilizar GNL (Gas Natural Licuado) en lugar de aceites combustibles.
- Demostrar objetivamente algunas de las prácticas utilizadas durante los procesos de elaboración de los firmes.
- La clasificación mediambiental de las secciones de firme de la Norma 6.1-IC, obteniendo la cuantificación relativa a un óptimo (gracias al proceso de ponderación). Los resultados obtenidos dictan que los firmes flexibles y semiflexibles producen, para todas las opciones estudiadas, impactos menores que los rígidos o semirígidos.

### 4.2.2. Proyecto Fénix

#### Descripción general

El *Proyecto Fénix: investigación estratégica en carreteras más seguras y sostenibles*, que tuvo lugar entre 2007 y 2010, es el mayor esfuerzo de I+D que se haya realizado en Europa en el ámbito de pavimentación de carreteras (*proyectofenix.eu*, 2019).



Estuvo formado por una serie de organizaciones y empresas españolas, tanto privadas como públicas. De todas ellas, la líder del proyecto fue la *Agrupación de Investigación Estratégica Proyecto Fénix (A.I.E.)* que estaba compuesta por seis empresas de la construcción y pavimentación (Sacyr, Elsan Pacsa, Pavasal, Sorigué, Collosa y Serviá Cantó), un fabricante de maquinaria para la producción de mezclas bituminosas (Intrame) y un laboratorio especializado (CIESM). Además de la A.I.E. incluía otros tres socios más: Repsol, como el fabricante de betunes más importante de España; Ditecpesa, como distribuidora de betunes; y el Instituto para la Investigación del Sector Asegurador Español para la mejora de la Seguridad Vial (Centro Zaragoza)

Entre las entidades públicas colaboradoras, se encontraron ocho universidades españolas, cinco centros tecnológicos, el Instituto de Investigación del CSIC de Cataluña y el Laboratorio del transporte del CEDEX. Es decir, un total de 26 organizaciones del ámbito español.

Este proyecto pudo llevarse a cabo gracias a la contribución financiera del *Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI)* del Gobierno de España, a través de su programa CENIT.

Durante estos cuatro años, se llevaron a cabo líneas de investigación de 12 actividades o tareas diferentes, cuyo objetivo era el desarrollo de nuevas tecnologías que permitiesen métodos de construcción y explotación de carreteras más sostenibles con el medio ambiente y más seguras para los usuarios. Estas tareas son:

1. Difusión
2. Nanomateriales
3. Lecho fluidizado
4. Mezclas templadas
5. Pavimentos Asfálticos Sostenibles
6. Pavimentos larga duración
7. Mezclas semicalientes
8. Reciclado en frío
9. Seguridad y confort
10. Empleo de subproductos
11. Reciclado en caliente
12. Plantas bajo consumo



### **Líneas basadas en el ACVF**

Entre los puntos anteriores, el que resulta de gran interés para este estudio, por su relación con el ACVF, es el de las “*Plantas de bajo consumo*”. Se evalúan nuevas tecnologías más sostenibles (tanto de materiales como de procesos constructivos) para la fabricación, transporte, puesta en obra, mantenimiento y fin de vida.

Se considera el impacto ambiental en la producción 1 tonelada de mezcla mediante el uso de diferentes tipos de plantas asfálticas: continuas o discontinuas, con diferentes tipos de combustible, fijas o móviles, etc. Para el resto de las etapas del ACVF, se utiliza como unidad funcional la sección transversal de firme (Perelli, M., 2018).

Sin embargo, la metodología del ACVF también es de utilidad para la línea de investigación sobre “*Empleo de subproductos*”, “*Reciclado en frío*” o “*Reciclado en caliente*”. En el primero se valora el uso de residuos como combustibles, los dos últimos comparan numerosas alternativas con distintos porcentajes de mezclas recicladas para evaluar las emisiones generadas. Finalmente, en el punto “*Pavimentos de larga duración*” también se utiliza el ACVF en la etapa de mantenimiento, con el objetivo de conocer aquellos materiales con mayor durabilidad.

### **Publicaciones relacionadas con el ACVF**

A raíz de las investigaciones anteriores, se publican una serie de artículos e informes, algunos disponibles en la página web del proyecto ([proyectofenix.eu/publicaciones](http://proyectofenix.eu/publicaciones), 2019). A continuación, se hace mención de varios de ellos:

- **“*Monografía 1 del Proyecto Fénix: Sostenibilidad*”:**

En esta monografía se hace inicialmente una introducción sobre el concepto de sostenibilidad, para después enlazarlo con la ingeniería. Sin embargo, el cuerpo principal del documento se basa en un recopilatorio de todos aquellos artículos relacionados con la sostenibilidad, que se redactaron a raíz del Proyecto Fénix. Por este motivo, supone un documento de ayuda para entender en qué consiste la metodología del ACV y sus posibles aplicaciones en la pavimentación.

De entre los diferentes artículos incluidos, resultan de interés para este estudio el titulado “*El Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Objetivos y límites de aplicación*”, donde se hace una introducción al concepto del ACV, presentado también sus limitaciones. Además, también se relacionan con el ACVF los artículos “*Análisis del Ciclo de Vida de las técnicas constructivas de pavimentos para carreteras*” o “*Ahorro energético en la fabricación de mezclas bituminosas*”. En estos dos últimos, se utiliza el ACV para comparar dos tipos de plantas asfálticas y distintos tipos de mezclas, respectivamente.

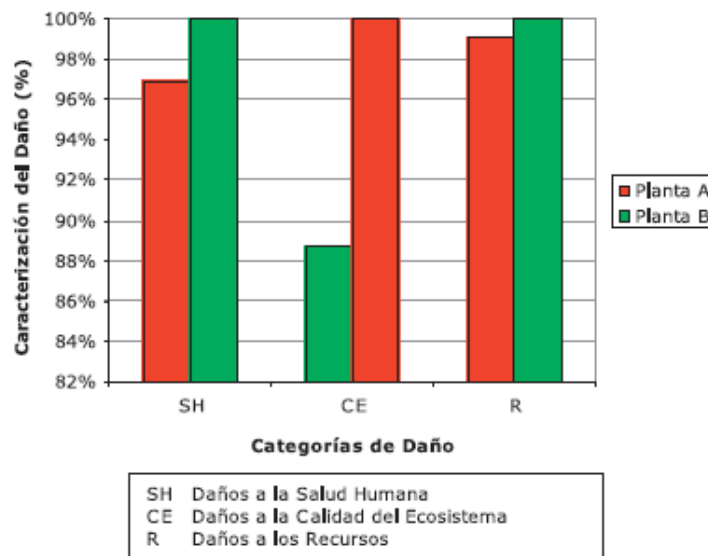
- **“*Análisis del Ciclo de Vida de las técnicas constructivas de pavimentos para carreteras*”, (Felipo, J. et al., 2008):**

En este artículo los autores se dedican a explicar, de manera general y sin entrar en los resultados obtenidos, el proceso seguido para la realización del ACV y de cada una de sus etapas.

Dentro el Proyecto Fénix se compara el impacto ambiental asociado al funcionamiento de diferentes plantas asfálticas. Se distinguen entre las de tipo continuo y discontinuo, fijas o móviles, con diferentes tipos de combustible, etc. y se considera como unidad funcional la producción de una tonelada de mezcla bituminosa.

Tras la definición de la unidad funcional, los objetivos y los límites del sistema, el inventariado para el análisis se divide en las diferentes partes que componen las plantas, incluyendo las cribadoras, las cisternas de ligantes, las cintas transportadoras, el mezclador, el quemador, etc. Como entradas se utiliza el consumo de energía, de combustible, la cantidad de fíller y áridos, o el consumo de material reciclado. Como salidas, se utilizan las emisiones atmosféricas y los residuos (*Felipo, J. et al., 2008*).

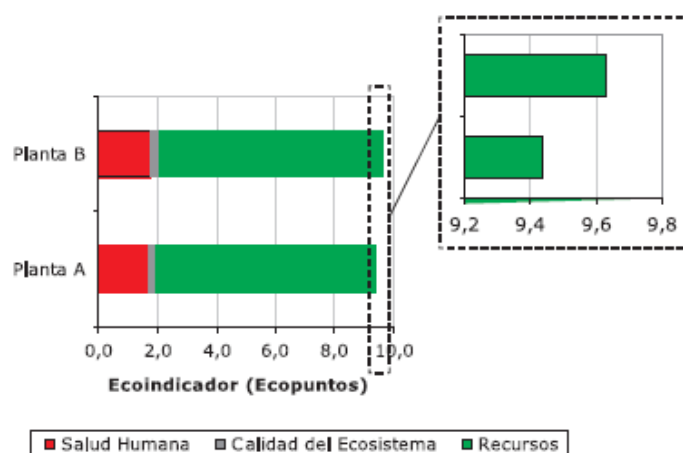
Con el inventario hecho, se procede a la evaluación de sus impactos. A modo de ejemplo genérico simplificado, en el artículo se muestran los valores obtenidos en dos plantas (Planta A y B) que se diferencian por el tipo de combustible utilizado, sin especificar de qué tipo es cada uno. Los resultados se presentan mediante gráficos de barras y para las categorías de daño que considera el Ecoindicador'99, es decir, daños a la Salud Humana (SH), a la Calidad del Ecosistema (CE) y a los Recursos (R) (*Figura 20*).



*Figura 20 Comparativa del daño asociado a dos plantas asfálticas (Ecoindicador'99).*

*Fuente: Felipo, J. et al., 2008.*

Mediante la normalización y ponderación de los datos del gráfico anterior (*Figura 20*) se obtienen los resultados del modo siguiente (*Figura 21*):



*Figura 21 Comparativa del impacto asociado al ciclo de vida de dos plantas asfálticas (Ecoindicador'99).*

*Fuente: Felipe, J. et al., 2008.*

En la figura anterior (*Figura 21*) se muestra el comportamiento ambiental de ambas plantas. Los resultados se presentan mediante Ecopuntos, donde un Ecopunto equivale a la milésima parte del impacto ambiental que genera un ciudadano medio en un año. Por este motivo, cuanto menor es la cantidad de Ecopuntos, menor es el impacto ambiental y, por consiguiente, más sostenible es la alternativa. Particularizando para las dos plantas de estudio y según los resultados obtenidos, se puede concluir que la Planta A es la más respetuosa con el entorno.

Este procedimiento se utiliza dentro del Proyecto Fénix para el cálculo de los diferentes tipos de plantas ya mencionados, obteniendo los resultados de la fase de producción de las mezclas. Los resultados sirvieron como base de partida para el cálculo, más adelante, de ACVs más completos que incluían numerosas etapas de la vida útil de las carreteras.

- **“Aplicación del análisis del ciclo de vida para la valoración de la sostenibilidad del reciclado de mezclas asfálticas en caliente”, (Sampedro, A. et al. 2009):**

En este documento, los autores presentan una metodología para el ACV en el caso de firmes contruidos mediante las técnicas de reciclado en caliente, utilizando diferentes proporciones de materiales procedentes del fresado asfáltico (*Reclaimed Asphalt Pavement – RAP*).

Para la obtención de unos resultados que se ajusten a los objetivos del estudio, los autores consideran que es fundamental la evaluación de la durabilidad y la reciclabilidad de las soluciones analizadas, puntos que, a menudo, no son considerados en muchas otras metodologías.

Siguiendo la misma estructura que en el caso anterior, el artículo explica con detalle cada una de las etapas que componen el ACV. En el caso de la *Fase 1: Definición del objetivo, alcance y límites del sistema*, se establece el deseo de desarrollar una metodología que

permita evaluar la sostenibilidad cuando se emplean elevadas tasas de RAP en la fabricación de mezclas asfálticas, frente a las mezclas convencionales. Todos los valores se referencian la unidad funcional que, en este caso, es una tonelada de mezcla bituminosa puesta en servicio y para un período de 20 años.

En la *Fase 2: Inventario del Ciclo de Vida (ICV)* se establecen los diferentes flujos con todas las entradas y salidas que constituyen el sistema, siendo la mayoría de datos proporcionados por la empresa Sorigué. De modo más visual, se muestra en el documento un diagrama de los flujos considerados.



Figura 22 Diagrama de flujo de la metodología propuesta. Fuente: Sampedro, A. et al., 2009.

Es importante mencionar que en el caso de los materiales que sean reciclables, se considera un período de evaluación de 40 años, equivalente a dos períodos de servicio normales, al volver éstos a ser utilizados.

En la *Fase 3: Evaluación del ICV* se evalúan los impactos considerando las mezclas con diferentes porcentajes de RAP. Finalmente, en la *Fase 4: Presentación e interpretación de los resultados*, se comparan, para las categorías de impacto analizadas, la contribución de cada una de las etapas y del tipo de mezcla.

En el artículo se presentan los resultados obtenidos en la comparación de dos mezclas asfálticas, la primera de ellas sin utilizar materiales reciclados y, la segunda, utilizando un 20% de RAP. En la figura de la página siguiente (*Figura 23*), se muestra como una mezcla con el 20% de RAP emite 36,65 kg de CO<sub>2</sub> eq por tonelada de mezcla, mientras que una convencional emite 43,93 kg de CO<sub>2</sub> eq.

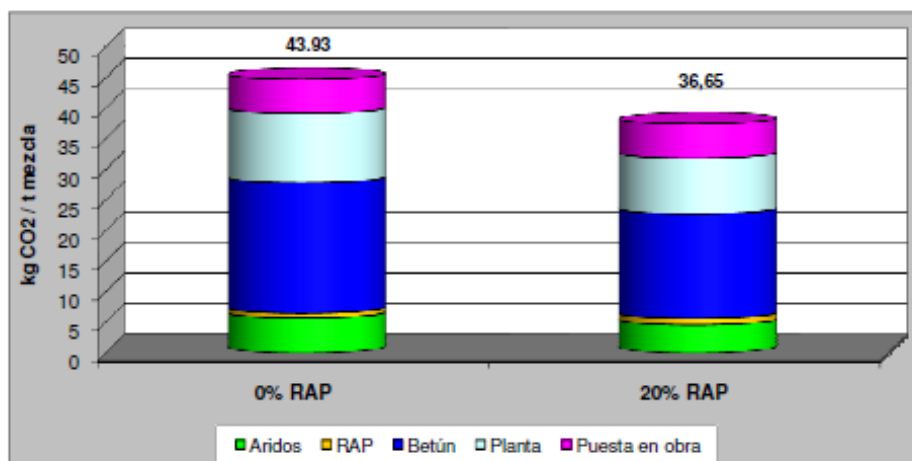


Figura 23 Emisiones de gases de efecto invernadero de los mezclas asfálticas con 0% y 20% de RAP.

Fuente: Sampedro, A. et al., 2009.

Los resultados demuestran que es posible obtener mezclas que comprometan en menor medida el medio ambiente en caso de utilizar un cierto porcentaje de material reciclado. A raíz de las conclusiones obtenidas utilizando esta metodología, dentro del proyecto se planteó la posibilidad de empezar a estudiar otros materiales reciclados. Un buen ejemplo sería el uso del caucho de neumáticos para la elaboración de betunes modificados.

- **“Huella de carbono del reciclado en planta asfáltica en caliente con altas tasas de RAP”, (Sampedro, A. et al., 2012):**

Como ya se ha mencionado, fruto de los resultados del artículo anterior, se realiza un estudio para el cálculo de la huella de carbono durante el proceso de fabricación de mezclas bituminosas. Con este objetivo, se utiliza el ACV para realizar la comparativa entre las mezclas convencionales, las mezclas con material asfáltico reciclado y aquellas con caucho procedente de viejos neumáticos. Dichas mezclas fueron ensayadas en el *Laboratorio de Caminos* de la *Universidad Politécnica de Madrid (UPM)*.

En el documento, publicado también en la revista *Asfaltos y Pavimentos*, se explica como la unidad funcional del sistema es, una vez más, la tonelada de mezcla bituminosa asfáltica en caliente fabricada y colocada en obra. En el caso de las etapas del ciclo de vida consideradas, se incluyen la extracción de los materiales, la fabricación, puesta en obra y demolición, dejando de lado el mantenimiento y conservación.

Los *inputs* y *outputs* para el inventario se obtienen de datos de diferentes tipos de obras entre los años 2007 y 2010, incluyendo mezclas con diferentes granulometrías para asegurar una mayor representatividad. En el caso de las salidas, se consideran datos de diferentes tipos de emisiones al aire ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ , etc.). Con el inventario realizado, se procede a su evaluación y al cálculo del ecoindicador seleccionado, en este estudio, el quilogramo de  $CO_2$  equivalente por tonelada de mezcla [ $kg\ CO_2\ eq/tn$ ].

Los resultados obtenidos se presentan en formato de tablas (*Figuras 24 y 25*) donde, en el primer caso, se muestran los  $kg\ CO_2\ eq/tn$  de una mezcla convencional (0% RAP) y dos mezclas con diferentes proporciones de material asfáltico reciclado (20% y 70% de RAP). En

el segundo caso, se muestran los valores para la misma mezcla convencional pero, esta vez, comparándola con dos mezclas con caucho reciclado (20% y 50% RAP-C). Los valores del ecoindicador se muestran para cada una de los subsistemas que componen las etapas del ciclo de vida útil.

MEZCLAS UPM	F0 - 0% RAP	F20 - 20% RAP		F70 - 70% RAP	
SUBSISTEMAS	kg CO <sub>2</sub> eq/t HMA	kg CO <sub>2</sub> eq/t HMA	Ahorro	kg CO <sub>2</sub> eq/t HMA	Ahorro
Subsistema 1: Extr. y proc. áridos	6,65	5,78	13,1%	3,42	48,5%
Subsistema 2: Filler	13,51	12,72	5,9%	12,63	6,5%
Subsistema 3: Betún asfáltico	11,97	8,81	26,4%	5,09	57,4%
Subsistema 4: Fabricación HMA	18,13	19,26	-6,3%	22,05	-21,7%
Subsistema 5: Puesta en obra HMA	1,49	1,49	0,0%	1,49	0,0%
Subsistema 7: Demolición	0,21	0,21	0,0%	0,21	0,0%
Subsistema 8: Transporte	9,91	9,44	4,8%	8,60	13,3%
TOTAL:	61,87	57,71	6,7%	53,50	13,5%

Figura 24 Emisiones de gases de efecto invernadero de los mezclas asfálticas con 0%, 20% y 70% de RAP.

Fuente: Sampedro, A. et al., 2012.

MEZCLAS UPM	F0 - 0% RAP	F20* - 20% RAP-C		F50* - 50% RAP-C	
SUBSISTEMAS	kg CO <sub>2</sub> eq/t HMA	kg CO <sub>2</sub> eq/t HMA	Ahorro	kg CO <sub>2</sub> eq/t HMA	Ahorro
Subsistema 1: Extr. y proc. áridos	6,65	5,75	13,5%	4,30	35,3%
Subsistema 2: Filler	13,51	12,63	6,5%	12,10	10,5%
Subsistema 3: Betún asfáltico	11,97	5,97	50,1%	10,42	13,0%
Subsistema 4: Fabricación HMA	18,13	19,32	-6,6%	20,98	-15,8%
Subsistema 5: Puesta en obra HMA	1,49	1,49	0,0%	1,49	0,0%
Subsistema 7: Demolición	0,21	0,21	0,0%	0,21	0,0%
Subsistema 8: Transporte	9,91	9,16	7,6%	9,25	6,7%
TOTAL:	61,87	54,53	11,9%	58,74	5,1%

Figura 25 Emisiones de gases de efecto invernadero de los mezclas asfálticas con 0%, 20% y 50% de RAP con caucho.

Fuente: Sampedro, A. et al., 2012.

Para las mezclas fabricadas con materiales asfálticos reciclados, se obtiene en ambos casos una reducción de las emisiones, siendo ésta del 6,7% para un porcentaje del 20%, y 13,3% para un porcentaje del 70% de RAP. El ahorro es debido en gran parte al hecho de tener que extraer una cantidad mucho menor de áridos. Sin embargo, la etapa de fabricación supone un mayor impacto debido al sobrecalentamiento necesario de los áridos.

Para las mezclas con caucho de neumáticos fuera de uso, se obtienen ahorros del 11,9% y 5,1% en mezclas fabricadas con un 20 y 50% de material reciclado con caucho, respectivamente. Igual que en el párrafo anterior, se reduce la cantidad de material nuevo pero se aumentan las emisiones durante la fabricación de la mezcla.

### Principales resultados del proyecto

Tras la finalización del proyecto se publicaron una serie de conclusiones y resultados. Aquellos relacionados con la temática del ACV han sido recogidos por el CEDEX en su monografía (Perelli, M., 2018).

En primer lugar, se muestra como los análisis de mezclas a partir de productos procedentes del reciclado presentan unos resultados más favorables en cuanto a emisiones al medio ambiente.

En segundo lugar, se plantea la falta de análisis de algunas de las etapas del ACV. Muchos estudios se centran en las fases de fabricación y puesta en obra, dejando de lado etapas como el mantenimiento. De la actividad 12 del Proyecto, se obtiene que las etapas con un mayor impacto son las de extracción y transporte de las materias primas (38,7%) y la de mantenimiento (35,9%).

Relacionado con el párrafo anterior, se obtiene que el betún es el material que presenta un impacto más elevado. De hecho, de entre todas las materias, éste puede llegar a ser de entre el 58 y 65%.

En tercer lugar, se obtiene que las mezclas fabricadas a bajas temperaturas presentan un impacto levemente inferior durante la fabricación al de las mezclas convencionales. No obstante, se hace mención a la importancia de considerar la durabilidad de la mezcla. Puesto que las mezclas menos durables requieren de mayores operaciones de mantenimiento y conservación.

Finalmente, del estudio de plantas asfálticas que utilizan diferentes tipos de combustible, se llega a la conclusión que los impactos ambientales de todas ellas presentan unos valores de impactos relativamente similares.

#### **4.2.3. Tesis de Ángel Sampedro (Sampedro, A., 2016)**

##### **Descripción general**

El Dr. Ángel Sampedro, profesor de la Universidad Alfonso X el Sabio y responsable de la Tarea 11 *“Reciclado en Caliente”* del Proyecto Fénix, es el autor de la Tesis Doctoral *“Análisis de Ciclo de Vida del empleo de Altas Tasas de reciclado en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente”* (Sampedro, A., 2016), entre otras muchas publicaciones.

Esta tesis, clara continuación de los resultados obtenidos a raíz del Proyecto, se basa en el desarrollo de una metodología que permita calcular la huella de carbono en la fabricación de mezclas bituminosas mediante la aplicación de la herramienta del ACV.

Con el principal objetivo de encontrar aquellas opciones menos comprometedoras con el medio ambiente, Sampedro analiza, por un lado, mezclas en caliente con diferentes porcentajes de asfalto recuperado (RAP) procedente del fresado de mezclas envejecidas. Por otro lado, el impacto generado en los procesos de fabricación a diferentes temperaturas, comparando las mezclas fabricadas en caliente con las semicalientes, las templadas y las fabricadas en frío. Para el desarrollo del proceso completo del ACV se sigue, por primera vez en una publicación, las directrices establecidas en la norma UNE-CEN ISO/ts 14067:2015 *“Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos. Requisitos y directrices para cuantificación y comunicación”* (Perelli, M., 2018).

La unidad funcional para la ejecución del ACV es, en este caso, una tonelada de mezcla bituminosa fabricada y puesta en obra para un período de estudio de 15 años. El establecimiento de los límites del sistema, uno de los puntos fuertes del estudio, alcanza toda la vida útil de la mezcla, sin considerar la fase de uso o explotación. Considera los inicios de su ciclo con la

extracción de las materias primas, la fabricación, la puesta en obra, su duración (de unos 15 años) y su fin de vida útil, siendo los residuos de la mezcla totalmente reciclables.

Otra de las ventajas es el inventario de datos del ciclo de vida (ICV), caracterizado por ser de gran calidad. Para los datos de entrada, muchos de ellos han sido facilitados por la empresa Sorigué, que ya colaboró en el Proyecto Fénix, y también se toman datos de campo en las principales obras españolas, seleccionando aquellas más representativas para garantizar la componente geográfica local del ACV. Estas mediciones se llevan a cabo entre los años 2008 y 2010, coincidiendo con el Proyecto Fénix. Para los datos de salida, se consideran las principales emisiones al aire, es decir, los gases  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ , etc. El ecoindicador utilizado es el quilogramo de  $CO_2$  equivalente por tonelada de mezcla bituminosa [ $kg\ CO_2\ eq/tn\ MB$ ].

Con el inventario hecho, se procede a su evaluación, obteniendo para cada tipo de mezcla, las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y llegando a los resultados y las conclusiones finales del estudio.

Es importante mencionar que, a lo largo de todo el análisis, numerosos expertos fueron revisando el proceso con el objetivo de realizar una revisión crítica y evitar el carácter subjetivo que, a menudo, caracteriza a muchos estudios de ACV.

### **Principales resultados**

Los resultados de la tesis se muestran diferenciando entre las dos líneas de investigación seguidas. Primeramente, se obtienen los valores del consumo energético de las diferentes subetapas del ciclo de vida de una mezcla bituminosa convencional, comparándola con dos mezclas hechas con distintas proporciones de mezclas recicladas. Concretamente, se analiza una AC22 surf S y otras dos con proporciones del 20 y 70% de RAP.

Para la mezcla convencional, se generan 60,15 kg de  $CO_2\ eq$ , de éstos el 30,1% corresponde a la fabricación de la mezcla. En el caso de las mezclas fabricadas con un 20% de material recuperado, el impacto total se reduce un 4,1% (es decir, 57,68 kg de  $CO_2\ eq$ ), y para las mezclas con un 70% de RAP, el ahorro de emisiones es del 11,1%, generando un total de 53,47 kg de  $CO_2\ eq$ .

Puede apreciarse que las conclusiones obtenidas respecto a las ventajas medioambientales del uso de materiales reciclados siguen la tendencia de lo ya comentado en el artículo sobre la huella de carbono del Proyecto Fénix y del mismo autor (*Sampedro, A. et al., 2012*). Del mismo modo, los ahorros derivan de la menor cantidad de ligante utilizada, así como de la reducción de áridos vírgenes.

En segundo lugar, respecto a la influencia de la temperatura en el proceso de fabricación, se obtiene que con las mezclas bituminosas semicalientes las emisiones se reducen un 8% respecto a la mezcla convencional fabricada en caliente.

Si se analiza las mezclas bituminosas templadas, el ahorro que se obtiene es del 15,2%. También se analiza para una mezcla templada pero fabricada, en lugar de con betún, con una emulsión bituminosa. En este caso, el ahorro de emisiones es de 16,9%.



Por último, para las mezclas fabricadas en frío, la reducción llega hasta un valor del 36,2%, principalmente debido a la gran reducción en el proceso de fabricación, al no ser necesario ningún calentamiento.

En definitiva, esta tesis supone un estudio muy exhaustivo del ACVF, aún sólo proporcionando resultados de una categoría de impacto ambiental. Además, a pesar de no ser objeto de la presente tesina, el autor también realiza un análisis de costes. Por este motivo, es un documento de referencia en los estudios de ACV tanto a nivel nacional como internacional.

#### **4.2.4. Tesis de Alberto Moral (*Moral, A., 2016*)**

##### **Descripción general**

El Dr. Alberto Moral es el autor de la tesis doctoral *“La herramienta ambiental Análisis del Ciclo de Vida en el estudio de secciones de firme. Evaluación ambiental de varias secciones de firme de categoría de tráfico T00 a T2 conforme a la Norma 6.1-IC”* presentada en la Universidad Alfonso X el Sabio en el año 2016 y, en el año 2017, galardonada con el *“Premio a la Mejor Tesis Doctoral”* de los Premios a la Innovación en Infraestructuras Viarias.

El principal objetivo de esta tesis es la evaluación, mediante el uso de la herramienta del ACV, del impacto medioambiental de algunas de las secciones de firmes no rígidas de la Norma 6.1-IC. Para ello, inicialmente, se consideran las etapas de extracción de materias, fabricación y puesta en obra. Después, el estudio se complementa añadiendo las etapas de mantenimiento y conservación y fin de vida para un periodo de 30 años. Además, el estudio se realiza para diferentes unidades funcionales, no sólo se calcula para una tonelada de mezcla bituminosa, sino que se obtienen resultados para diferentes secciones con múltiples diseños y categorías de tráfico.

Antes de abordar el caso práctico para la ejecución del ACV, el autor presenta cuál es su estado actual. Se describen con detalle numerosos estudios y se presentan algunas de las herramientas disponibles.

En lo que al propio ejercicio de ACV se refiere, se analizan diez tipos diferentes de secciones, cada una de ellas con dos tipos de capa de rodadura: una mezcla drenante (PA) y otra de discontinua en caliente (BBTM), para las etapas de la vida útil ya mencionadas.

El inventario del ciclo de vida (ICV) se caracteriza por su calidad y elevado grado de detalle, obteniendo todos los *inputs/outputs* de datos reales proporcionados por la empresa Pavasal. Para el caso de las operaciones de mantenimiento y conservación, únicamente tiene en consideración aquellas directamente relacionadas con el firme, ya sean de tipo ordinario o extraordinario (ver punto 3.3.2.4. *Fase de mantenimiento y rehabilitación*). En relación a la etapa de fin de vida, se valora el vertedero como destino final, puesto que considerar el reciclado habría incrementado notablemente el grado de variables del sistema.

En la tercera etapa, la Evaluación del Inventario del Ciclo de Vida (EICV), se hace con tres tipos de indicadores de impacto ambiental. Éstos son: consumo de agua, cinco indicadores *midpoint* (acidificación, calentamiento global, demanda acumulada de energía, eutrofización y oxidación fotoquímica) y uno *endpoint* (*ReCiPe H/A*) (ver punto 2.6. *Categorías de impacto*).

Finalmente, los resultados se obtienen utilizando como herramienta de cálculo el *software SimaPro*, uno de los programas de tipo generalista para el cálculo de ACV más conocido a nivel internacional.

### **Principales resultados**

Los principales resultados obtenidos son, para las secciones estudiadas, los impactos medioambientales de cada una de sus capas por un lado y, por el otro, los impactos asociados a cada una de las etapas de su ciclo de vida útil.

Los primeros demuestran que, para una misma categoría de tráfico, las capas que generan una mayor cantidad de emisiones son las que tienen un mayor volumen. Es decir, existe una relación directa entre el espesor de la capa y su impacto, siendo las capas subbase (especialmente las que incluyen materiales con cemento y ligantes) y base, las que más afectan al medio ambiente, mientras que las subbases hechas con zahorra son la opción más sostenible. Si se analizan los resultados para las diferentes categorías de tráfico, se obtiene que, a medida que disminuye ésta, los impactos que se generan también son menores.

Los segundos, asociados a las diferentes etapas de la vida útil del firme, se dividen entre el análisis de la cuna a la puerta (*cradle to gate*) y de la cuna a la tumba (*cradle to grave*). En el primer caso, la etapa que genera unos impactos mayores es la extracción de las materias primas, seguida del proceso de fabricación (enormemente marcado por el calentamiento de los áridos). Siguiendo la tendencia de los resultados de la tesis de Sampedro (*Sampedro, A., 2016*), también se obtiene que las mezclas semicalientes presentan ahorros energéticos respecto a las de tipo caliente. La etapa que genera unos impactos menores es la de la puesta en obra en todas las secciones estudiadas.

En el segundo caso, se obtiene que la etapa de conservación y mantenimiento es aquella que presenta unos impactos más relevantes. Por ello, se extrae como conclusión que las operaciones de mantenimiento que se lleven a cabo son un factor clave en la sostenibilidad de la infraestructura.

Es importante remarcar que esta tesis ha servido de base para la elaboración de la hoja de cálculo del IECA dónde, a partir de los resultados obtenidos por Moral, se ha completado el estudio del ACV para las secciones de firmes rígidos (apartado 5.2.3. *Evaluación del ACVF y CCVF de las secciones de firme (IECA)*).

### **4.2.5. Proyecto LIFESURE**

#### **Descripción general**

*LIFESURE (Self-sustaining Urban Roads: A way to improve Environmental performance of urban areas)* es un proyecto español que tuvo lugar entre septiembre de 2013 y diciembre de 2018. Durante estos más de cinco años, contó con la colaboración de la empresa Sacyr, el CEDEX y el Ayuntamiento de Madrid, además de recibir fondos de la Comisión Europea dentro del programa *LIFE+* (*lifesure.es, 2019*).



El objetivo principal del proyecto es desarrollar un modo de fabricación más sostenible de mezclas bituminosas templadas con tasas de reciclado del 100% (ecoasfalto) para capas de rodadura, intermedia y base en vías urbanas. Estas mezclas serán menos comprometedoras con el entorno al utilizar materiales reciclados, reducir las cantidades de energía consumida y, por consiguiente, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Para poder conseguir el objetivo mencionado se desarrolla un plan de trabajo con unos objetivos específicos. Entre ellos, el uso de la herramienta del ACV como cuantificador de impactos medioambientales, permitiendo la comparación entre estas mezclas recicladas y las convencionales.

### **Plan de trabajo del proyecto**

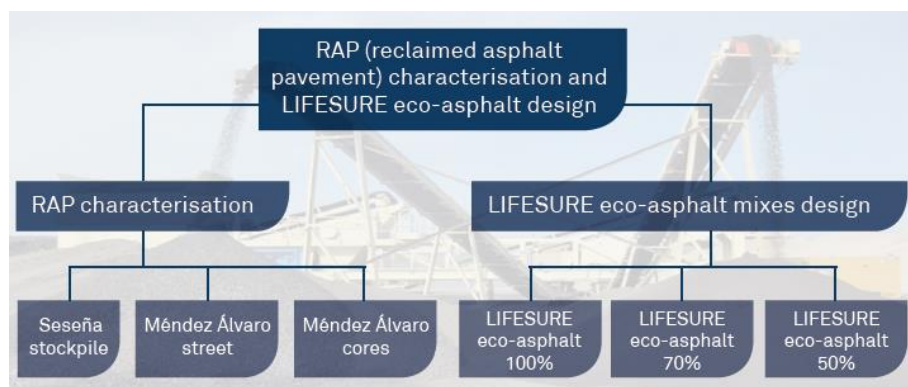
El desarrollo del proyecto se encuentra descrito en el informe publicado por la misma organización (*Layman's Report, 2018*). Éste se divide en un total de seis actividades, que son:

- WP 1: Estudio de posibles ubicaciones para el extendido del ecoasfalto.

El Ayuntamiento de Madrid se encargó de preparar una lista de calles que precisaban rehabilitación. De todas ellas, se terminó seleccionando la Calle Méndez Álvaro para testar los nuevos materiales, con una superficie total de 18.000 m<sup>2</sup>.

- WP 2: Caracterización fisicoquímica del RAP.

En esta etapa se caracterizaran física y químicamente los materiales de fresado que van a ser utilizados en las secciones experimentales y se diseñan las mezclas que se van a producir en la planta prototipo (*Figura 26*).



*Figura 26 Caracterización del ecoasfalto. Fuente: Layman's Report, 2018.*

- WP 3: Diseño y construcción de la planta para la fabricación del ecoasfalto.

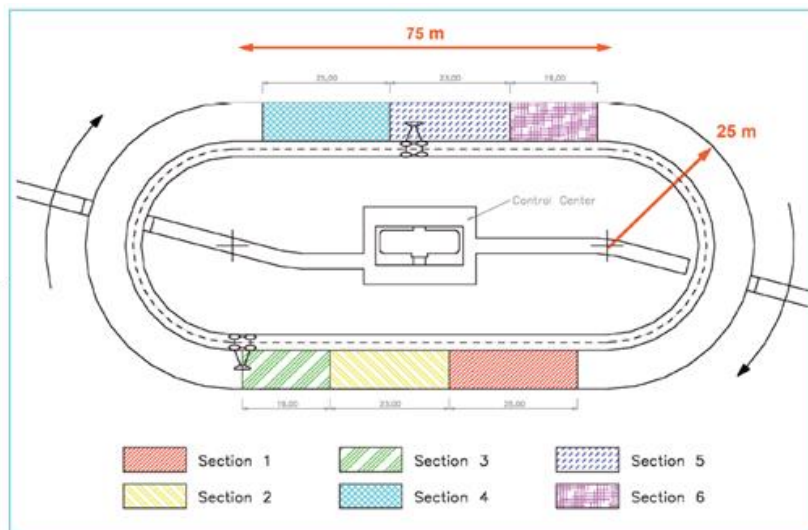
Esta parte del proceso consiste en el diseño y construcción de una planta prototipo específica para la producción del ecoasfalto LIFESURE (100%). Para su correcto diseño, se realizan los planos y dibujos necesarios, así como un estudio para la localización

- WP 4: Evaluación técnica del comportamiento del ecoasfalto.

Para la evaluación del comportamiento mecánico del ecoasfalto, se llevan a cabo dos tipos de ensayo. Por un lado, se realizan test en la pista de ensayos y, por otro lado, se ensayan tramos urbanos en la calle elegida, incluyendo auscultaciones.

En el primer caso, se divide la pista en diferentes secciones de 25 metros de longitud. En una sección se analiza una mezcla con el 70% de RAP, en otra el 100% y, finalmente, una mezcla convencional AC16S. En la figura que sigue (*Figura 27*) se muestra la configuración por capas de las secciones objeto de estudio, así como la distribución en planta en la pista de ensayo.

Section 1	Section 2	Section 3	Thickness (cm)
Lifesure eco-asphalt 70%	Lifesure Eco-Asphalt 100%	Hot Mix Asphalt (AC16S)	5
Artificial Graded aggregate			12
Soil Type 1			60
Soil type 2			40
Soil			108
Concrete slab			



*Figura 27 Secciones testadas en la pista de ensayo. Fuente: Layman's Report, 2018.*

En el segundo caso, siguiendo la tipología de las secciones anteriores, se realizan los ensayos en tramos reales de la calle Méndez Álvaro, distinguiendo entre los sentidos de subida y bajada (*Figura 28*). Se testan el contenido de huecos, el módulo de rigidez y se hace una caracterización del ligante, mediante el ensayo de penetración y el punto de reblandecimiento, durante los años 2015, 2016 y 2017.

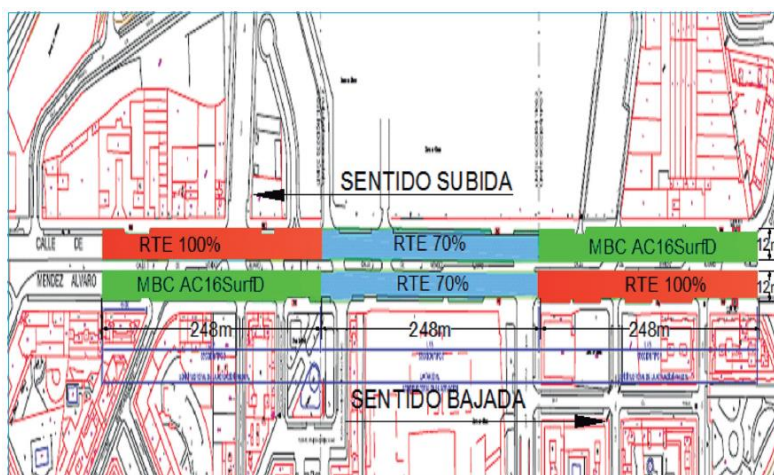


Figura 28 Tramos de ensayo en la calle Méndez Álvaro. Fuente: Layman's Report, 2018.

- WP 5: Análisis del Ciclo de Vida

Con la realización del ACV se pretende poder cuantificar los impactos ambientales asociados a los ecoasfaltos con 70% y 100% de RAP a lo largo de su vida útil, para poder compararlo con la mezcla de tipo convencional.

Para ello, se realiza un inventario con los consumos, emisiones y residuos, tanto del proceso de fabricación convencional como del de la planta prototipo diseñada. Las etapas que se consideran son la extracción de materias primas, la fabricación y la puesta en obra de las mezclas.

- WP 6: Establecimiento de especificaciones y procedimientos

Finalmente, se busca poder establecer las especificaciones y procedimientos necesarios para la integración de criterios medioambientales para que puedan servir de ejemplo en otras ciudades. Además, se pretende seleccionar aquellas localidades que puedan ser candidatas para la implementación de la iniciativa *LIFESURE* y realizar una divulgación de los resultados.

**Principales resultados**

Mientras tuvo lugar el proyecto, se llegó a un seguido de conclusiones. Primeramente, a raíz de los ensayos realizados en la calle Méndez Álvaro, se obtiene que el comportamiento mecánico del ecoasfalto es similar al de las mezclas convencionales. Por lo que, a partir de los resultados, se demuestra que ambos tipos de ecoasfalto pueden ser utilizados en áreas urbanas.

En segundo lugar, y en relación al Análisis del Ciclo de Vida, se obtiene que los ecoasfaltos resultan ser una alternativa más sostenible que las mezclas convencionales, produciéndose una reducción de las emisiones de GEI en todas las etapas del ciclo analizadas.

Si se observa la figura superior (Figura 29), puede verse la puntuación relativa de los tres tipos de mezclas para cada una de sus etapas. En todas, la etapa que genera unos mayores impactos es la extracción de materias primas, reduciéndose considerablemente cuando se utilizan materiales reciclados. La figura inferior (Figura 30) muestra la reducción de los GEI de los ecoasfaltos respecto a la mezcla convencional en caliente. A pesar de producirse un incremento en la etapa de puesta en obra, si miramos el cómputo global, se consiguen ahorros del 42,6% y del 46,6% del total de emisiones para las mezclas con 70% y 100% de RAP, respectivamente.

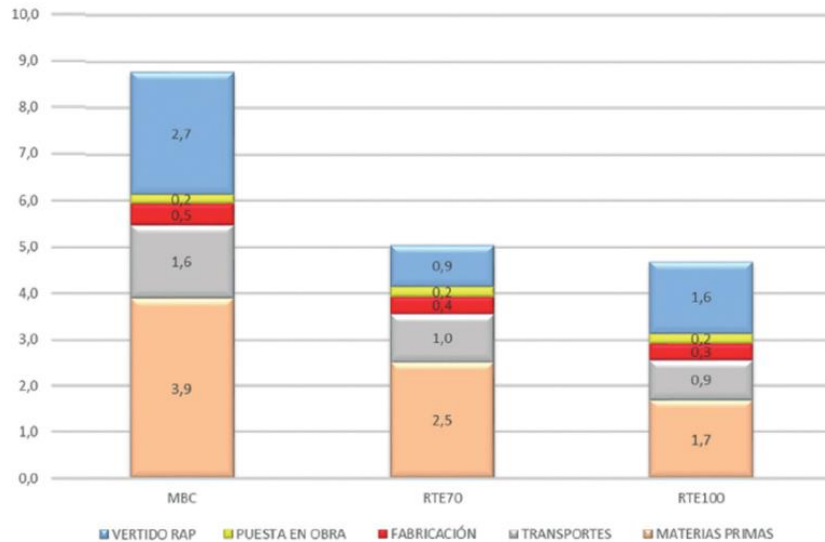


Figura 29 Impacto relativo de cada mezcla y etapa. Fuente: Layman's Report, 2018.

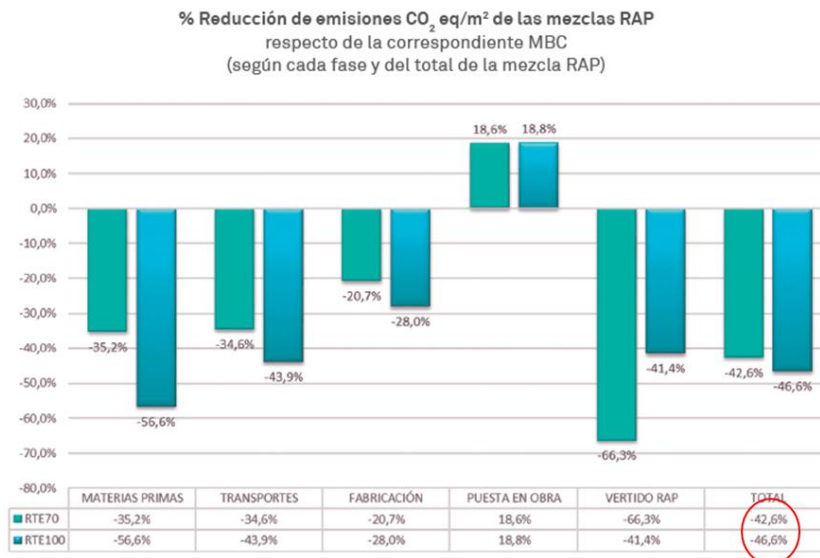


Figura 30 Reducción de emisiones en los ecoasfaltos para cada etapa. Fuente: Layman's Report, 2018.

Gracias a estos resultados, se llega a la conclusión de seguir desarrollando ecoasfaltos con el objetivo de promover técnicas de fabricación que sean más sostenibles. Estas mezclas presentan unas ventajas muy competitivas respecto a las mezclas convencionales, por lo que se abren posibles líneas futuras de investigación.

### 4.3. Comparativa entre las metodologías analizadas

La evaluación detallada de las metodologías anteriores ha hecho posible realizar una comparativa entre ellas, con el objetivo de cotejar mejor su alcance y resultados.

Para empezar, se ha podido comprobar como prácticamente todos los estudios analizados se centran en el ACV del firme (ACVF), sin considerar la totalidad de la carretera, hecho que complicaría enormemente el estudio. Sin embargo, a pesar de no haberse mencionado en estas

páginas, el proyecto *LCE4ROADS* considera también en algunos puntos los impactos asociados a los movimientos de tierras.

En relación a las unidades funcionales establecidas, puede observarse como hay una cierta inconsistencia entre los estudios. La mayoría de ellos, especialmente aquellos que no tienen un horizonte temporal, utilizan como UF la tonelada de mezcla bituminosa. Por otro lado, los análisis realizados para un período de tiempo determinado, suelen utilizar como UF diferentes secciones de firme de la Norma 6.1-IC. No obstante, los horizontes temporales seguidos, y que se resumen en la siguiente tabla (*Tabla 2*) tampoco coinciden en todos los casos. A nivel más completo, destaca la tesis de Moral (*Moral, A., 2016*) dónde se estudian los dos tipos de UFs.

*Tabla 2 Metodologías de ACVF y su horizonte temporal. Fuente: Elaboración propia.*

Metodología	Horizonte temporal [años]
<i>ECRPD</i>	20
Proyecto Fénix	20
Tesis de Sampedro	15
Tesis de Moral	30

En cuanto a las etapas del ciclo de vida consideradas (*Tabla 3*), la única metodología que realiza un estudio completo es *LCE4ROADS*. De hecho, a nivel nacional todavía no existe ningún estudio de ACV que incluya la totalidad de etapas del sistema.

*Tabla 3 Etapas del CV analizadas en cada metodología. Fuente: Elaboración propia.*

Metodología		Horizonte temporal [años]				
		Prod. Materiales	Construcción	Mant. y Rehab.	Explotación/ Uso	Fin de vida
	<i>ECRPD</i>	X	X	X	X	
	<i>LCE4ROADS</i>	X	X	X	X	X
	Re-Road		X	X	X	X
	AVACo	X	X			
	Proyecto Fénix	X	X	X		X
	Tesis de Sampedro	X	X	X		X
	Tesis de Moral	X	X	X		X
	<i>LIFESURE</i>	X	X			

La mayoría de estudios se centran en las etapas de producción de materiales (incluyendo las etapas de extracción de las materias y su transporte) y construcción (con la fabricación de la mezcla y la puesta en obra). Algunas metodologías, como los proyectos europeos *ECRPD*, *Re-Road*, o estudios españoles como el Proyecto Fénix y las tesis de Sampedro (*Sampedro, A., 2016*) y Moral (*Moral, A., 2016*), también consideran algunas actividades de mantenimiento y rehabilitación.



La etapa de uso es la más olvidada de todas, principalmente por las dificultades que presenta para la cuantificación de los impactos. En ella, existen muchas variables que no dependen únicamente de una componente medioambiental, como por ejemplo las congestiones de tráfico, sino que llevan inherente una componente social. Por último, la etapa de fin de vida se considera especialmente en aquellos estudios de ACV que se centran en la evaluación del posible uso de materiales reciclados. La tesis de Moral (*Moral, A., 2016*) también considera el fin de vida, pero en este caso todos los materiales se dirigen a vertedero, sin valorar la reciclabilidad.

Referente a las categorías de impacto ambiental seleccionadas, los indicadores escogidos también presentan una gran variabilidad. Sin embargo, los más comunes son el consumo energético total y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para la evaluación de los impactos, las herramientas informáticas utilizadas tampoco son las mismas en todos los casos. La mayoría de proyectos opta por *softwares* específicos y diseñados para la metodología en cuestión. De los estudios analizados, los únicos que utilizan herramientas generalistas son el Proyecto Fénix y la tesis doctoral de Alberto Moral (*Moral, A., 2016*), ambos trabajando con el programa *SimaPro*.

Los resultados que se obtienen siguen todos una misma tendencia. Para los estudios que no consideran las actividades de mantenimiento, aquellas etapas que presentan unos mayores impactos son la obtención de las materias primas, con la producción de los materiales y el transporte. En los estudios con horizontes temporales, generalmente, la etapa de mantenimiento y rehabilitación tiene un peso muy importante, especialmente para categorías de tráfico elevadas.

En cuanto a los valores obtenidos en los análisis con materiales reciclados y fabricaciones a menores temperaturas, todos ellos presentan considerables ahorros energéticos. A pesar de ello, se recalca en numerosas ocasiones, la importancia de testar el comportamiento mecánico del material. Éste afecta directamente a su durabilidad, por lo tanto, en caso de que ésta no fuese la esperada, podrían incrementarse las tareas de mantenimiento o rehabilitación. Es decir, el ahorro energético conseguido durante los procesos de fabricación, se vería enmascarado por los impactos generados durante el mantenimiento del firme.

Finalmente, también se ha podido comprobar como en muy pocos casos se realiza un análisis del ciclo de costes (CCV). Esta tendencia de integración entre impactos medioambientales y monetarios, muy establecida en países como los Estados Unidos, apenas se aplica a nivel Europeo. Realizan estudios de costes únicamente *LCE4ROADS*, la tesis de Sampedro (*Sampedro, A., 2016*) y la de Moral (*Moral, A., 2016*).

#### **4.4. Otras metodologías de interés**

Para terminar el capítulo y sin entrar en detalle, se ha considerado importante hacer mención de los proyectos desarrollados en Francia, al ser un país que ha apostado bastante por la investigación acerca de esta temática. Este hecho ha llevado a la publicación de numerosos documentos y trabajos de gran calidad relacionados con el ACVF.



Destacan las publicaciones de la Dra. Ventura y su equipo del *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*, dónde se hace una revisión crítica de la idoneidad del uso de la herramienta del Análisis del Ciclo de Vida para las infraestructuras viarias. También existe el documento “*Analyse du cycle de vie de structures routières. Document synthétique*” (Análisis de ciclo de vida de infraestructuras de carretera. Documento sintético) (2005) del organismo Cimbéton, basado en el ACV de todas las etapas de la vida útil de diferentes secciones de firme (Perelli, M., 2018).

No obstante, además de las investigaciones francesas, el país dónde se ha realizado un mayor número de estudios acerca del ACVF ha sido Estados Unidos, especialmente en el Centro de Investigación de Firmes de la Universidad de California (*University of California Pavement Research Center – UCPRC*). Este centro se ha encargado de la redacción del documento “*Pavement LCA Guideline*” (2010), guía de referencia para los estudios de ACVF. Además, existe también el informe “*Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research*” (2010), que analiza la documentación existente hasta el momento acerca del ACVF. Finalmente, destacar también la creación de la herramienta informática *PaLATE*, por la *University of California (Berkeley)*, que permite realizar tanto ACV como CCV específicamente para carreteras.

## Capítulo 5

### HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS DE ACVF

Uno de los principales objetivos de este proyecto es, además de conocer el estado actual del Análisis del Ciclo de Vida en Carreteras y las metodologías seguidas hasta el momento, la realización de un estudio ambiental de una sección tipo de firme mediante una herramienta de ACVF. Para ello, es necesario conocer los *software* disponibles a día de hoy en el mercado.

En este capítulo, se clasifican las herramientas informáticas según su enfoque, el tipo de estudio, su ámbito geográfico o el tipo de acceso, entre otras características. A continuación, se hace un estudio detallado de algunos de los programas que *a priori* se cree que mejor encajan en las necesidades del trabajo. Finalmente, entre todas las opciones analizadas, se hace una selección para poder llevar a cabo el caso práctico.

#### 5.1. Tipos de herramientas de ACVF

En la actualidad existen en el mercado una serie de aplicaciones informáticas para la realización de los estudios de ACV. En este apartado, y siguiendo la misma estructura de agrupación que la del CEDEX en su monografía (*Perelli, M., 2018*), se realiza una clasificación de los *software* en función de cuáles sean sus características.

##### 5.1.1. Según el enfoque

Dependiendo del enfoque que tengan las herramientas, éstas se pueden clasificar en las de tipo generalista o las de tipo específico.

- Generalistas: son aquellas que permiten realizar el ACV para cualquier tipo de proceso o producto, con posibilidad de considerar todas las etapas de su ciclo de vida.

Los principales programas de tipo genérico son, básicamente, *GaBi*, *SimaPro* y *Umberto*. Estas herramientas suelen trabajar con bases de datos muy completas y que se actualizan frecuentemente, evitando así que queden obsoletas. Algunos ejemplos de BBDDs serían: *EcolInvent*, *GaBi Professional Database* o *U.S. LCI database* (ver apartado 2.5.2. *Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV)*). De hecho, es posible trabajar a la vez con varias de ellas, e incluso existe la opción de editar los datos o incorporar otros de nuevos.

A la hora de realizar la evaluación del inventario (EICV), se pueden seleccionar entre un gran número de categorías de impacto, desde las más comunes a casos más específicos, distinguiendo entre aquellas de efecto intermedio (*midpoint*) o las de efecto final (*endpoint*) (ver apartado 2.6. *Categorías de impacto*).

Los resultados de los impactos se presentan con un nivel de detalle muy elevado, mostrando tanto los valores numéricos, en formato tabla, como representaciones gráficas mucho más visuales. Los resultados pueden dividirse en cada una de las etapas o subetapas que definen el sistema de estudio. Además, también se pueden agrupar entre afecciones al agua, aire o suelo.

Sin embargo, la principal limitación que presentan este tipo de herramientas es su dificultad, siendo necesario bastante tiempo de uso antes de coger soltura en el manejo y en la interpretación de los resultados proporcionados. En los programas genéricos, es necesario la definición desde cero del sistema completo, con cada una de las actividades que incluye, para después poder realizar el inventariado con todos los datos.

- Específicas: son aquellas pensadas para aplicar en un caso particular o sector concreto. Para este estudio serían los *software* especialmente diseñados para la realización del ACV para el sector de las carreteras, concretamente para los firmes. Por este motivo, el abanico de ofertas es mucho más amplio que en el punto anterior.

En este caso, las etapas del sistema consideradas dependen de la herramienta en cuestión. La mayoría de ellas considera la fase de producción de materiales y la construcción, es decir, la puesta en obra. Existen también algunas que contemplan las etapas de mantenimiento y rehabilitación, o incluso el fin de vida. No obstante, la fase de uso o explotación del firme es contemplada en muy pocos casos. En la actualidad, la única herramienta que contempla el ciclo completo del ACVF es la holandesa *DuboCalc*.

El inventariado suele realizarse a partir de BBDDs con datos extraídos de ensayos de laboratorio o de obras similares localizadas en el ámbito geográfico del estudio, por lo que la extrapolación a otros países no es siempre posible.

Estos programas suelen trabajar con categorías de impacto concretas, dependiendo de la herramienta de trabajo. A pesar de ello, la mayoría contempla el consumo energético o las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Se trata de herramientas más simples e intuitivas, pensadas para que puedan trabajar fácilmente con ellas los técnicos. Los resultados, aunque depende bastante de la herramienta, suelen presentarse de un modo muy claro y mucho más simplificado que en el caso de las generalistas.

### 5.1.2. Según el tipo de estudio

Según el tipo de estudio que puedan realizar las herramientas, éstas pueden clasificarse en:

- Exclusivas: son aquellas que permiten únicamente la realización de ACVF. También existen programas exclusivos de análisis de costes CCVF.
- Combinadas: son aquellas aplicaciones que permiten la ejecución del análisis medioambiental y de costes, conjuntamente.

Es importante mencionar que existen herramientas, como *HueCO<sub>2</sub>* (ver punto 5.2.5. *HueCO<sub>2</sub>*), que únicamente disponen de un inventario de datos con el que es posible calcular las emisiones de una categoría concreta, en este caso, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

### 5.1.3. Según el ámbito geográfico

Tal y como se ha comentado en el punto 2.8. *Limitaciones del ACV*, en algunos estudios de ACV no se considera la escala geográfica. Sin embargo, las condiciones locales no tienen por qué ser las mismas a nivel global y viceversa.

Por este motivo, es importante distinguir las herramientas según su ámbito geográfico de aplicación en:

- Globales: de ámbito internacional. Se incluyen en esta clasificación principalmente las de tipo genérico.
- Regionales o locales: concebidas para ser utilizadas en un país o región en concreto, trabajando con sus datos propios.

### 5.1.4. Según el tipo de acceso

Las aplicaciones también pueden clasificarse según el tipo de acceso:

- Gratuitas: son aquellas que no tienen coste alguno y se encuentran disponibles libremente para el usuario.
- Gratuitas de uso restringido: son aquellas que tampoco tienen ningún coste para el usuario, pero en las que es preciso realizar algún tipo de registro en la página *web* para su descarga.
- De pago: son aquellas que requieren del pago de una licencia para su utilización, ya sea en el momento de su adquisición o periódicamente.

### 5.1.5. Otras características

Además de las distinciones realizadas hasta el momento, para la elección de la herramienta que más se adecúe a nuestras necesidades, es importante tener en cuenta otras consideraciones. En primer lugar, es importante valorar la lengua de trabajo, puesto que algunas únicamente se encuentran disponibles en inglés o en el idioma propio del país (por ejemplo, *DuboCalc* únicamente está disponible en holandés).

En segundo lugar, es importante valorar la existencia de material complementario, como guías de utilización, para comprender mejor su manejo. Ligado a este punto también se agradece conocer el entorno de trabajo del software, como por ejemplo, *Excel*.

Finalmente, también debe valorarse el grado de actualización, para garantizar que trabajamos con datos actuales y que no han quedado obsoletos.

## 5.2. Análisis de las herramientas seleccionadas

En este punto se analizan detalladamente una serie de herramientas con el objetivo de poder, al final del análisis, escoger aquella que mejor se adapte a las necesidades del estudio para la realización del ejemplo práctico.

### 5.2.1. Consideraciones previas

Tras analizar las herramientas disponibles para la ejecución de un ACVF que se adaptase a los objetivos del trabajo, se ha visto necesario establecer una serie de consideraciones previas con el fin de acotar el ámbito del estudio.

Por un lado, se ha valorado el poder analizar tanto herramientas de tipo genérico, como de tipo específico para firmes. Además, se han seleccionado aquellas aplicables al ámbito español y que trabajasen con bases de datos nacionales o, en su defecto, de carácter europeo, evitando aquellas con datos exclusivos de otros países.

Por otro lado, por razones obvias de uso, se han buscado programas que fuesen gratuitos (incluyendo los de uso restringido), o en caso de tratarse de programas de pago, se ha valorado la posibilidad de trabajar con una versión de estudiante que no requiera licencia.

Finalmente, para facilitar la comprensión, se han seleccionado aquellos programas que trabajen con la lengua española o inglesa y, además, que dispongan de materiales complementarios de soporte o ayuda.

En las próximas páginas se describirán, una a una, las herramientas seleccionadas, empezando por la de tipo genérico, para terminar con las de tipo específico. Finalmente, se espera poder realizar una comparación entre ellas para poder escoger aquella opción que mejor se adapte a las necesidades del trabajo.

### 5.2.2. GaBi

#### 5.2.2.1. Descripción general



*GaBi* es la herramienta informática más utilizada en la actualidad para la realización de estudios de ACV y CCV. Se trata de una herramienta de tipo genérico de la empresa alemana de consultoría *Thinkstep*, que permite el análisis ambiental y económico de todo tipo de procesos, productos o servicios del ciclo de vida completo (*gabi-software.com*, 2019).

Es un programa apto para el entorno *Windows* e *IOs* que requiere licencia. Ésta puede variar entre los 1.125 y los 15.000€, dependiendo si se trata de la modalidad académica o profesional. Existe además, una versión de prueba gratuita durante un mes, que se obtiene mediante una solicitud previa.

*GaBi* trabaja con las principales bases de datos (ver punto 2.5.2. *Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV)*), incluyendo: *GaBi Databases*, *EcolInvent*, *U.S. LCI*, e incluso existe la posibilidad de introducir nuevos datos, en caso de no estar éstos disponibles. También se pueden cargar bases de datos de sectores específicos, existiendo una específica para edificación o construcción.

Por lo tanto, los datos son de ámbito internacional, encontrando también datos de países concretos, y se actualizan frecuentemente. Al tratarse de una herramienta utilizada a nivel mundial, se encuentra disponible en múltiples idiomas, incluyendo el español.

Se trata de una herramienta profesional bastante compleja, motivo por el cual no se utiliza corrientemente en estudios más sencillos. Considera todas las etapas del ciclo de vida, sin embargo, es necesario definir todos los procesos y subetapas considerados en el sistema. También hay que definir la unidad funcional con la que se quiere trabajar.

En su página *web* pueden encontrarse una serie de videos tutoriales con ejemplos de iniciación, para facilitar la primera toma de contacto con el programa. Además, es posible contratar cursos de aprendizaje o servicios de soporte técnico.

En cuanto a los resultados, incluye una gran variedad de indicadores medioambientales y metodologías de evaluación, tal y como se comenta más adelante (*punto 5.2.2.3. Presentación de los resultados*).

#### **5.2.2.2. Modo de trabajo**

A continuación, con el objetivo de ejemplificar el modo de trabajo de *GaBi*, se muestran los pasos que deberían seguirse para la realización de un análisis muy simplificado.

##### **1. Selección de la base de datos de trabajo:**

El primero de los pasos es la selección de la base o bases de datos con las que se quiere trabajar, para poder cargar los datos. Para el caso de este ejemplo, se ha podido trabajar exclusivamente con la base de datos de la versión estudiante.

##### **2. Creación de un plan y de los procesos incluidos:**

Una vez seleccionada la base de datos, es necesario la creación del plan o sistema de estudio, que incluirá todos los procesos o etapas del ciclo de vida. Por ejemplo, en el caso de querer realizar un análisis ambiental de una sección de firmes, el plan sería toda la vida útil de ésta.

Una vez creado el plan, deben añadirse los procesos o etapas consideradas. Éstos dependerán del tipo de análisis que se realice. Siguiendo con el ejemplo anterior, si se trata de un análisis de la cuna a la puerta, incluirá el procesado de los materiales hasta su puesta en obra. Por el contrario, si se trata de un estudio completo, de la cuna a la tumba, deberá incluir también las etapas de transporte, mantenimiento o rehabilitación, uso y fin de vida.

##### **3. Adición de la información de los flujos:**

Con los procesos o etapas ya definidos, deben introducirse todos sus flujos. Esta fase consiste en la definición de todas las entradas y salidas, es decir, el inventario del ciclo de vida. Estos datos se buscan en las BBDDs con las que trabajemos.

ES: Producción mezcla <u-so> [Material production] -- BD Procesos \*

Objeto Editar Visualizar Ayuda

Nombre ES Producción mezcla Fuente

Parámetros

Parámetros	Fórmula	Valor	Mínimo	Máximo	Desviaci	Comer
Parámetros						

ACV ACC: 0 EUR ACTT Documentación

Integridad Ningún dato

Entradas

Flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	Ma	Desviaci	Origen
Limestone gravel [Limestone]	Mass	0	kg	X	0 %	(Ningún dato)
Heavy fuel oil [Crude oil product]	Mass	0	kg	X	0 %	(Ningún dato)
Bitumen [Organic intermediate products]	Mass	0	kg	X	0 %	(Ningún dato)

Flujo

Salidas

Flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	Ma	Desviaci	Origen
Asphalt [Minerals]	Mass		kg	X	0 %	(Ningún dato)

Figura 31 Introducción de flujos de entrada y salida. Fuente: GaBi.

Al buscar los datos, se muestra su fecha de última modificación, la categoría en la que se incluyen, e incluso es posible conocer su origen. Además, abriendo la opción *detalles*, se pueden ver los impactos asociados a cada entrada/salida (Figura 32). También es posible la creación de nuevos datos, mediante la opción *Objeto->Nuevo*.

Bitumen [Organic intermediate products] -- BD Flujo

Objeto Editar Visualizar Ayuda

Nombre Nación Imen

Magnitud de referencia Mass

Magnitudes ACC Documentación

Magnitud	1 kg = *	Unidad	1 [Magnitud]	Comentario
Energy (gross calorific value)	42,6	MJ	0 %	0,0235
Energy (net calorific value)	38,7	MJ	0 %	0,0258
Market price US97	0,0885	EUR	0 %	11,3
Volume	0,000967	m3	0 %	1,03E003

Magnitud

Figura 32 Impactos asociados al betún. Fuente: GaBi.

#### 4. Referencia de los flujos a la unidad funcional:

Con el listado de datos completo, deben introducirse las cantidades referenciadas a la unidad funcional. *GaBi* permite trabajar con diferentes unidades, realizando la conversión automática.

Si consideramos la etapa de producción de mezcla bituminosa y 1 tonelada como unidad funcional, debemos referenciar todas las cantidades a la UF. Por ejemplo, en caso de tener un 4,5% de betún, deben introducirse un total de 45 kg por tonelada (Figura 33).

Entradas						
Flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	Ma	Desviaci	Origen
Limestone gravel [Limestone]	Mass	1E003	kg	X	0 %	(Ningún dato)
Heavy fuel oil [Crude oil product]	Mass	0,15	kg	X	0 %	(Ningún dato)
Bitumen [Organic intermediate I]	Mass	45	kg	X	0 %	(Ningún dato)
Flujo						
<						
Salidas						
Flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	Ma	Desviaci	Origen
Asphalt [Minerals]	Mass	1E003	kg	X	0 %	(Ningún dato)
Flujo						

Figura 23 Introducción de las cantidades de los flujos. Fuente: GaBi.

Una vez introducidas todas las cantidades y referenciadas a la UF, en este caso 1 tonelada de mezcla, se puede calcular para más toneladas, introduciendo la opción en *Factor de escala*.

ES: Producción mezcla <u-so> -- Cuadro de proceso

Nombre local: ES: Producción mezcla <u-so>

Configuraciones locales: ACC

Factor de escala: 1 ☒ Fijado

Parámetros libres: pFreeParams

Parámetros fijos: pFixedParams

Entradas	Mostrar sólo desechos valorizables	Salidas							
ParámetFlujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	Ma	ParámetFlujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	Ma
Bitumen [Organic intermediate]	Mass	45	kg	X	Asphalt [Minerals]	Mass	1E003	kg	X
Heavy fuel oil [Crude oil product]	Mass	0,15	kg	X					
Limestone gravel [Limestone]	Mass	1E003	kg	X					

Figura 33 Introducción del factor de escala. Fuente: GaBi.

## 5. Conexión de los procesos:

Cuando el inventario de todos los procesos está completo, deben conectarse los procesos entre sí. Por ejemplo, para el ciclo de vida de la mezcla, el proceso de producción o fabricación debe conectarse con el transporte y éste con la puesta en obra (Figura 35).

### Ciclo de Vida Mezcla Bituminosa

Diagrama proceso GaBi: Mass [kg]  
Se muestran los nombres de los procesos básicos.

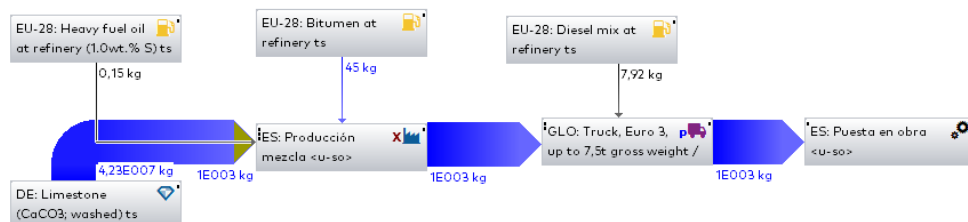


Figura 34 Conexión de los procesos del CV. Fuente: GaBi.

## 6. Cálculo del balance:

Finalmente, cuando el plan ya está totalmente definido, es posible el cálculo del balance para la obtención de los resultados.



### 5.2.2.3. Presentación de los resultados

A nivel de presentación de resultados, *GaBi* proporciona un grado de detalle muy elevado. La herramienta permite ver los resultados resumidos y detallados, tanto del ACV como del CCV, de todos los flujos del sistema. Además, en el caso del análisis ambiental, permite separar los impactos según si éstos estén asociados a las entradas o a las salidas (*Figura 36*).

Entradas	ES: Ciclo de Vi	Entradas	ES: Ciclo de Vi
<b>Flows</b>	<b>8,55E003</b>	<b>Flows</b>	<b>8,55E003</b>
<b>Resources</b>	<b>8,55E003</b>	<b>Resources</b>	<b>8,55E003</b>
<b>Others</b>		<b>Energy resources</b>	<b>11,1</b>
		<b>Non renewable energy resources</b>	<b>11,1</b>
		<b>Crude oil (resource)</b>	<b>9,19</b>
		Crude oil (in MJ)	9,07
		Oil sand (10% bitumen) (in MJ)	0,107
		Oil sand (100% bitumen) (in MJ)	0,00937
		<b>Hard coal (resource)</b>	<b>0,317</b>
		<b>Lignite (resource)</b>	<b>0,805</b>
		<b>Natural gas (resource)</b>	<b>0,824</b>
		<b>Peat (resource)</b>	<b>0,000881</b>
		<b>Uranium (resource)</b>	<b>1,5E-005</b>
		<b>Renewable energy resources</b>	
		<b>Land use</b>	
		<b>Material resources</b>	<b>8,54E003</b>
		<b>Others</b>	

Figura 35 Resultados numéricos agrupados en flujos. Fuente: GaBi.

Adicionalmente, existe la posibilidad de modificar las unidades con las que se expresan los resultados, y no sólo eso, también pueden verse los resultados agrupados en cantidades y no en flujos (*Figura 37*).

Entradas	ES: Ciclo de Vida Mezcla Bitumini	Salidas	ES: Ciclo de Vida Mezcla Bitumini
<b>Quantities</b>		<b>Quantities</b>	
<b>Economic quantities</b>		<b>Economic quantities</b>	
Cost [EUR]	-49,3		
Market price US\$97 [EUR]	5,8E-013		
Price [EUR]	7,35E-005		
<b>Environmental quantities</b>		<b>Environmental quantities</b>	
<b>AADP, TU Berlin</b>			
<b>CML 2001 - Jan. 2016</b>			
<b>Global Warming Incl Land Use Change (LUC)</b>			
<b>Non-baseline CML</b>			
CML2001 - Jan. 2016, Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb eq.]	4,32E-006		
CML2001 - Jan. 2016, Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]	439		
CML2001 - Jan. 2016, Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO2 eq.]	2,51		
CML2001 - Jan. 2016, Global Warming Potential (GWP 100 years), excl biogenic carbon [kg CO2 eq.]			
<b>Earlier versions of methods</b>			
<b>EDIP 2003</b>			
<b>EF 1.8</b>			
<b>EPD EN 15804</b>			

Figura 36 Resultados numéricos agrupados en cantidades. Fuente: GaBi.

Los resultados pueden verse, además de numéricamente, de modo gráfico. El programa permite graficar los resultados de diferentes categorías de impacto, dependiendo de la metodología de evaluación escogida. *GaBi* dispone de las principales metodologías establecidas, cada una de ellas considerando una serie de categorías.

Los gráficos que se muestran son de barras, proporcionando el resultado total (como suma de todos los impactos) y la contribución individual de los diferentes procesos del plan o sistema definido. También se puede ver la contribución de cada *input/output* para cada uno de los procesos. Por ejemplo, en la imagen (Figura 38) se muestran los resultados si se escoge como metodología la *LCIA – CML 2001*, dónde las principales categorías de impacto son el Calentamiento Global (*GWP – Global Warming Potential*), la Acidificación (*AP – Acidification Potential*), la Eutrofización (*EP – Eutrophication Potential*) o el Agotamiento de la Capa de Ozono (*ODP – Ozone Layer Depletion Potential*).

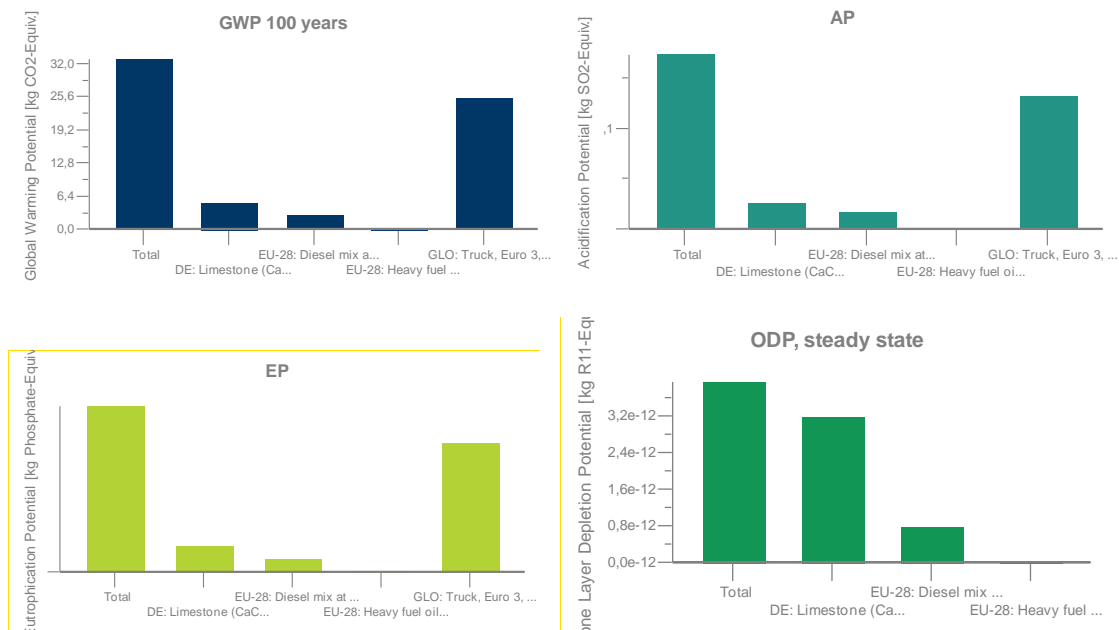


Figura 37 Resultados gráficos. Fuente: GaBi.

Existe incluso la posibilidad de analizar los puntos débiles (*weak points*), marcando en rojo aquellos resultados de elementos o procesos cuya contribución al total de impactos generados es superior al 10%.

#### 5.2.2.4. Ventajas e limitaciones

Las principales ventajas y limitaciones que han podido identificarse de *GaBi* son:

##### Ventajas

- Herramienta combinada (ACV+CCV).
- Idioma español, entre otras opciones.
- Diferentes bases de datos.
- Posibilidad de introducción de nuevos datos.
- Datos españoles o internacionales.
- Actualización frecuente.
- Se pueden considerar todas las etapas del CV.
- Permite trabajar con diferentes UF.

- Tutoriales de uso y cursos formativos
- Todas las principales categorías de impacto.
- Resultados numéricos y gráficos.
- Resultados totales y parciales (por etapas y entradas/salidas).

#### Limitaciones

- Difícil manejo, principalmente utilizado por expertos del sector del ACV.
- Requiere de una licencia bastante elevada.
- Dificultad para encontrar algunos datos específicos de firmes, por lo menos en la versión estudiante.
- Es necesaria la creación de las etapas y procesos considerados.

### **5.2.3. Evaluación del ACVF y CCVF de las secciones de firme (IECA)**

#### **5.2.3.1. Descripción general**

El *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones* (IECA) diseñó, en el año 2012, una herramienta específica de cálculo “*Estudio económico de las secciones de firme*” para la realización de análisis de costes de las secciones de firmes (CCVF). Años más tarde, y tras la publicación de la tesis de Moral (*Moral, A., 2016*), se ha desarrollado una nueva herramienta de tipo combinado que integra tanto el análisis económico como el ambiental (CCVF y ACVF).

La hoja de cálculo, en formato *Excel*, permite calcular tanto los costes ambientales como económicos de diferentes secciones de firme de la Norma 6.1-IC y para diferentes horizontes temporales. Concretamente, trabaja con secciones de mezcla bituminosa y zahorra, mezcla bituminosa y suelocemento, mezcla bituminosa con gravacemento y suelocemento, hormigón armado continuo y hormigón en masa con pasadores sobre hormigón magro.

Los valores de los impactos ambientales de las distintas capas se basan en los resultados de la tesis anterior, excepto los de hormigones, que han sido calculados por el IECA. En la tesis, se ha realizado el ACV con el *software SimaPro* y la base de datos *Ecoinvent*, utilizando para las dosificaciones de los materiales datos proporcionados por la empresa PAVASAL. Sin embargo, el programa del IECA es una hoja abierta, permitiendo modificar los datos e introducir los valores de cualquier otro inventario (tanto para los aspectos ambientales como para los costes).

Se trata de una herramienta de uso libre y ámbito nacional, disponible en la *web* del IECA con previo registro ([ieca.es/categoria-producto/programas-informaticos/](http://ieca.es/categoria-producto/programas-informaticos/)), aunque en este momento se encuentra sujeta a revisión. El idioma de trabajo es el español y dispone además de una hoja “Guía de uso del programa”, donde se describe cómo deben ser introducidas las entradas del sistema para el cálculo del ACVF y CCVF.

La unidad funcional de trabajo es 1 km de calzada de 2 carriles de circulación y los respectivos arcenes, aunque el desglose de los resultados permite ver los impactos producidos en otras unidades (*ver punto 5.2.3.3. Presentación de los resultados*). En cuanto a los límites del sistema, esta herramienta incluye la totalidad de las etapas del ciclo de vida, a excepción del fin de vida.

### 5.2.3.2. Modo de trabajo

A continuación, se listan los pasos que deben seguirse para ejecutar el estudio completo. Se realiza una explicación detallada de cada uno de ellos, completándola con imágenes de la herramienta para facilitar la comprensión.

#### 1. Introducción de los datos generales de la sección (Hoja: Datos generales de la sección):

El primer paso es la introducción del *Nombre de la sección* y del *Periodo de estudio*. En el horizonte temporal se pueden introducir valores de 10 a 40 años, en intervalos de 10.

En segundo lugar, debe definirse geoméricamente la sección, tanto para el caso de la calzada como para los arcenes interior y exterior. Para la calzada se introduce la longitud (considerada 1000 metros por defecto) y el ancho, ambos en metros. Además, se definen los espesores [cm] de las diferentes capas que componen el firme, así como sus materiales y el sobreancho entre capas [m]. Del mismo modo, se introduce el ancho, espesores y materiales que conforman los arcenes (Figura 39).

DEFINICIÓN DE LA SECCIÓN		
CALZADA		
LONGITUD	1000	m
ANCHO	7.00	m
	TIPO DE MATERIAL	ESPESOR (cm)
CAPA 1	Capa de rodadura de Microaglomerado	3
CAPA 2	Riego de emulsión termoadherente	0
CAPA 3	Capa intermedia de MB	8
CAPA 4	Riego de emulsión termoadherente	0
CAPA 5	Capa de base de MB	11
CAPA 6	Riego de emulsión termoadherente	0
CAPA 7	Capa de base de MB	13
CAPA 8	Riego de imprimación	0
CAPA 9	Zahorra artificial	25
CAPA 10	Sin capa	0
SOBREANCHO ENTRE CAPAS	0.2	m

ARCÉN EXTERIOR		
ANCHO	2.50	m
	TIPO DE MATERIAL	ESPESOR (cm)
CAPA 1	Capa de rodadura de Microaglomerado	3
CAPA 2	Riego de emulsión termoadherente	0
CAPA 3	Capa intermedia de MB	12
CAPA 4	Riego de imprimación	0
CAPA 5	Zahorra artificial	45
CAPA 6	Sin capa	0
CAPA 7	Sin capa	0
CAPA 8	Sin capa	0
CAPA 9	Sin capa	0
CAPA 10	Sin capa	0

Figura 38 Ejemplo de la definición de la calzada y arcén exterior. Fuente: Hoja cálculo IECA.

El listado de materiales disponibles es:

- Betún
- Capa de base de MB
- Capa de rodadura de hormigón en masa HF-5,0
- Capa de rodadura de MB
- Capa de rodadura de Microaglomerado
- Capa intermedia de MB
- Fíller de aportación
- Gravacemento
- Hormigón armado continuo (HAC)
- Hormigón en masa HF-3,5
- Hormigón en masa HF-4,0
- Hormigón en masa HF-4,5
- Hormigón en masa HF-4,5 con pasadores

- Hormigón magro
- Prefisuración
- Riego de curado
- Riego de emulsión termoadherente
- Riego de imprimación
- Sin capa (esta opción se escoge en caso de no disponer de la capa)
- Suelocemento
- Zahorra artificial

Una vez introducidos los parámetros geométricos de la sección, se introducen las distancias de transporte [km] de todos los materiales que conformarán las diferentes capas en construcción y mantenimiento.

Después, a pesar de no ser objeto de este estudio, se deben completar las casillas de *Tasa de interés anual* y *Tasa de descuento*, ambas en porcentaje [%], para poder hacer el cálculo actualizado de los costes de mantenimiento.

Finalmente, debe responderse a la pregunta: *¿Quiere generar los precios descompuestos?* En caso afirmativo, se deben introducir los precios unitarios de materiales, maquinaria y mano de obra, y el programa utiliza los rendimientos propuestos por el IECA para el cálculo del coste de unidades. En caso negativo, se pueden introducir los costes de las unidades o trabajar con los valores medios de bases de precios públicas, introducidas por defecto.

## 2. Introducción de las estrategias de mantenimiento y conservación (Hoja: Datos mantenimiento-conservación):

La herramienta permite considerar diferentes estrategias de mantenimiento:

- Reposición de pavimento [cm]:
  - Reposición parcial MB base
  - Reposición total MB base
  - Reposición parcial MB intermedia
  - Reposición total MB intermedia
  - Reposición parcial MB rodadura
  - Reposición total MB rodadura
  - Reposición de espesor de HAC
  - Reposición de espesor completo de Hmasa
- Refuerzo pavimento [cm]:
  - Refuerzo MB base
  - Refuerzo MB intermedia
  - Refuerzo MB rodadura
  - Refuerzo de HAC
  - Refuerzo de espesor completo de Hmasa
  - Refuerzo delgado de HM

- Juntas [m de junta por m<sup>2</sup>]:
  - Reparación y sellado de fisuras en MB
  - Resellado de juntas
- Fresado [cm por m<sup>2</sup>]:
  - Fresado de pavimento
- Rehabilitación superficial [cm]:
  - Lechada
  - Capa de microaglomerado
  - Riego monocapa
  - Riego monocapa doble engravillado
  - Riego bicapa

Para cada una de ellas, es necesario indicar la cantidad en las respectivas unidades (por ejemplo, para refuerzos se indican los cm de espesor), la cadencia de la operación [años] y el % de la superficie en el que se aplica. La cadencia de años puede tener valores entre 5 y 30, con intervalos de 5 años. Una vez introducidos estos datos, el programa da automáticamente el *Número de operaciones de mantenimiento en el período de estudio*.

A modo de ejemplo, se muestra en la imagen (*Figura 40*) como se consideran dos actividades de mantenimiento, concretamente, el refuerzo de las capas intermedia y de rodadura de la mezcla. En el primer caso, se supone un refuerzo de 7 cm, mientras que en el segundo es de 3 cm. Ambos refuerzos se aplican en la totalidad de la superficie (100%) y con una frecuencia de 10 años. Por lo tanto, si se ha considerado un periodo de estudio de 30 años, se consideran un total de 3 operaciones de cada tipo.

REFUERZO PAVIMENTO	Refuerzo capa (cm)	Cadencia de la operación (años)	% de la superficie	Números de operaciones de mantenimiento en el período de estudio
Refuerzo MB base	0	10	100.00	3.00
Refuerzo MB intermedia	7	10	100.00	3.00
Refuerzo MB rodadura	3	10	100.00	3.00

*Figura 9 Ejemplo de la definición de las operaciones de mantenimiento. Fuente: Hoja cálculo IECA.*

En cuanto a las estrategias de conservación, debe introducirse el *Ratio para conservación por año del coste de construcción* [%]. Por defecto, se considera para las secciones de Tipo 1, 2 y 3 el 0,5% del coste de construcción, y para las secciones Tipo 4, el 0,25%.

### 3. Elaboración del inventario (Hoja: Coste e impactos unidades):

Para el análisis ambiental deben introducirse una serie de datos de entrada o *inputs*. Esta herramienta permite introducir, para los distintos tipos de materiales que conforman el firme:

- Densidad [t/m<sup>3</sup>].
- Dotación de betún [%] (para MB o microaglomerados).
- Dotación de filler [%] (para MB o microaglomerados).

Las salidas u *outputs* con los que trabaja, todos ellos modificables, son obtenidos de la tesis de Moral (*Moral, A., 2016*) y se basan en diferentes categorías de impacto cuyos datos provienen de la base de datos *Ecoinvent* del programa *SimaPro*.

Concretamente, para cada una de las entradas del sistema, las categorías de salida son:

- Calentamiento Global [kg CO<sub>2</sub> eq]
- Agotamiento de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]
- Acidificación [kg SO<sub>2</sub> eq]
- Eutrofización [kg PO<sub>4</sub> eq]
- Oxidación Fotoquímica [kg C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> eq]
- Agotamiento Recursos Abióticos [kg Sb eq]
- Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]
- Toxicidad [kg eq 1,4 DB]

Para el cálculo de los impactos asociados al transporte (*Hoja: Transporte*), la herramienta dispone de una tabla con los impactos por km de las categorías anteriores para los principales tipos de camión, obtenidos de la base de datos *EcolInvent*. El valor final con el que trabaja el programa es la media de todos los valores anteriores (*Figura 41*).

Transporte								
Impactos del transporte de 24 t por km								
	Calentamiento Global [kg CO <sub>2</sub> eq]	Agotamiento de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO <sub>2</sub> eq]	Eutrofización [kg PO <sub>4</sub> eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> eq]	Agotamiento Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [kg eq 1,4 DB]
16-32 ton EURO3	0.19066678	1.32354E-08	0.000928581	0.000225082	3.04377E-05	4.37242E-07	2.802145012	26.01961264
16-32 ton EURO4	0.17178321	1.19268E-08	0.00068517	0.000162181	2.31415E-05	4.34458E-07	2.542462203	24.95630774
16-32 ton EURO5	0.17400685	1.20725E-08	0.000554112	0.000127728	2.33187E-05	4.34748E-07	2.573238571	24.67652904
7.5-16 ton EURO3	0.245449917	1.677E-08	0.001202514	0.000285642	4.02105E-05	4.72672E-07	3.578252079	83.0248231
7.5-16 ton EURO4	0.228546398	1.56661E-08	0.00088609	0.000206845	2.93503E-05	4.70473E-07	3.345031301	81.4905136
7.5-16 ton EURO5	0.231494593	1.58603E-08	0.000719138	0.000162271	2.95659E-05	4.7088E-07	3.386045992	80.79788249
MEDIA	0.206891264	1.42552E-08	0.00023687	0.000154958	2.83371E-05	4.53409E-07	3.037862526	53.4842761
GENERIC LORRY	0.166309544	1.16758E-08	0.000812362	0.000197606	2.72682E-05	4.30395E-07	2.473794108	26.01961264

Figura 10 Cálculo de los impactos asociados al transporte por km. Fuente: Hoja cálculo IECA.

Para el análisis de costes se generan automáticamente unos costes de unidades de obra a partir de precios unitarios de materiales, maquinaria y mano de obra (introducidos por el usuario o los que hay por defecto, de bases de precios públicas) en las hojas "*Materiales*", "*Maquinaria*" y "*Mano de obra*". El cálculo de los costes se realiza con unos rendimientos fijados de antemano por la herramienta, pero que se pueden variar en la pestaña "*Precios descompuestos*".

### 5.2.3.3. Presentación de los resultados

#### Resultados para el ACVF

Los resultados se presentan, para las 8 categorías de impacto anteriores, tanto con valores numéricos como gráficos. En la hoja "*Resumen de impactos*" se presentan una serie de tablas (*Figura 42*) con los impactos de las siguientes etapas del ciclo de vida:

- Construcción y transporte de materiales.
- Mantenimiento y transporte de materiales.
- Impactos totales con el transporte de materiales.

**RESUMEN DE IMPACTOS DE CONSTRUCCIÓN CON EL TRANSPORTE DE MATERIALES**

4121	Calentamiento Global [kg CO <sub>2</sub> eq]	Agotamiento de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO <sub>2</sub> eq]	Eutrofización [kg PO <sub>4</sub> eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> eq]	Agotamiento Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [Kg eq 1,4 DB]
	742,091.40	0.63	3,014.55	2,063.62	214.87	0.92	22,516,204.37	177,721,339.74

**RESUMEN DE IMPACTOS DE MANTENIMIENTO CON EL TRANSPORTE DE MATERIALES**

4121	Calentamiento Global [kg CO <sub>2</sub> eq]	Agotamiento de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO <sub>2</sub> eq]	Eutrofización [kg PO <sub>4</sub> eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> eq]	Agotamiento Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [Kg eq 1,4 DB]
	860,908.83	0.23	3,168.15	580.86	279.18	0.90	31,971,761.63	154,963,865.52

**IMPACTOS TOTALES CON EL TRANSPORTE DE MATERIALES**

4121	Calentamiento Global [kg CO <sub>2</sub> eq]	Agotamiento de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO <sub>2</sub> eq]	Eutrofización [kg PO <sub>4</sub> eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> eq]	Agotamiento Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [Kg eq 1,4 DB]
	1,603,000.23	0.86	6,182.70	2,644.48	494.04	1.83	54,487,966.00	332,685,205.26

Figura 11 Resultados de las categorías de impacto por etapa del CV. Fuente: Hoja cálculo IECA.

Estos valores son los impactos que se generan para la UF, en este caso 1 km de calzada, y para el periodo de estudio escogido (30 años en el ejemplo). Los resultados incluyen dentro de las etapas del CV el transporte, no obstante, es posible conocer el impacto del transporte aislado en cada etapa consultando la hoja “Transporte”.

En cuanto a la representación gráfica, el programa facilita gráficos de barras donde se presenta, para cada categoría de impacto, las emisiones generadas en las etapas de construcción y mantenimiento, así como el total. Se adjunta en la figura que sigue (Figura 43), a modo de ejemplo, el gráfico relativo a la categoría de Calentamiento global [kg CO<sub>2</sub> eq].



Figura 12 Calentamiento global para cada etapa del CV. Fuente: Hoja cálculo IECA.

Además de los resultados de la sección de firme agrupados en las etapas analizadas, es posible conocer los impactos de cada una de las capas que la componen. Los impactos se presentan por unidad de material, siendo ésta la [tn] en el caso de MB y microaglomerados, el [m<sup>2</sup>] para riegos y el [m<sup>3</sup>] para hormigones, zahorra, suelocemento y gravacemento. Los impactos asociados a las actividades de mantenimiento también se muestran divididos por actuación.



### Resultados para el CCVF

En el caso del análisis de costes, los resultados se muestran de un modo similar al caso anterior. Se presentan tablas con los costes totales asociados a la sección y para el horizonte temporal analizado, divididos en las diferentes etapas del ciclo de vida, y completados con gráficos de barras. Además, también se muestran los costes asociados únicamente a la calzada y a los arcenes (agrupando el arcén interior y exterior) (*Figuras 44 y 45*).

4121	COSTE TOTAL €	COSTE TOTAL CALZADA €	COSTE TOTAL ARCENES €
	1,343,884.53 €	985,292.74 €	358,591.79 €
	COSTE TOTAL CONSTRUCCIÓN €	COSTE CONSTRUCCIÓN CALZADA €	COSTE CONSTRUCCIÓN ARCENES €
	516,888.93 €	391,371.98 €	125,516.95 €
	COSTE TOTAL MANTENIMIENTO €	COSTE MANTENIMIENTO CALZADA €	COSTE MANTENIMIENTO ARCENES €
	743,218.07 €	530,487.07 €	212,731.00 €
	COSTE TOTAL CONSERVACIÓN €	COSTE CONSERVACIÓN CALZADA €	COSTE CONSERVACIÓN ARCENES €
	83,777.52 €	63,433.69 €	20,343.83 €

Figura 44 Costes totales, de calzada y arcenes por etapa del CV. Fuente: Hoja cálculo IECA.

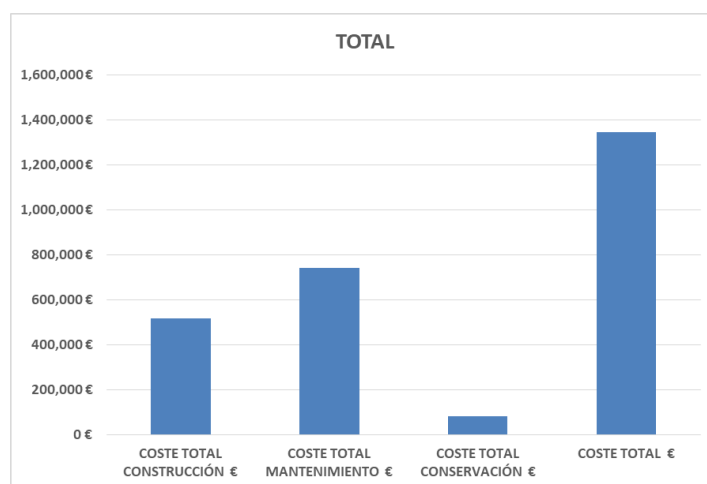


Figura 13 Costes totales por etapa del CV. Fuente: Hoja cálculo IECA.

La herramienta no sólo muestra el resumen de los costes de las etapas. Pueden verse detallados los costes asociados a la etapa de construcción en la hoja “*Cálculos sección construcción*”. Ahí se muestra el coste de construcción de cada una de las capas, en función del material y espesor introducidos, diferenciando entre calzada y arcenes.

Los costes asociados a cada una de las etapas de mantenimiento definidas se muestran detallados en la hoja “*Cálculo sección mantenimiento*”, donde del mismo modo, se obtiene el valor monetario de cada actividad.

También es posible ver detallados los costes de conservación, calculados a partir del *Ratio por año del coste de construcción* previamente fijado, el interés anual, la tasa de inflación y el periodo de estudio.

4121	Ratio por año del coste de construcción	Actualización en período de estudio	COSTE CONSTRUCCIÓN CALZADA €	COSTE CONSTRUCCIÓN ARCENES €	COSTE CONSERVACIÓN CALZADA €	COSTE CONSERVACIÓN ARCENES €
	0.50%	32.416	391,371.98 €	125,516.95 €	63,433.69 €	20,343.83 €

Interés anual	1.00%
Tasa de inflación	1.50%
PERÍODO DE ESTUDIO	30

Figura 14 Costes asociados a la conservación del firme. Fuente: Hoja cálculo IECA.

Por último, se pueden obtener los precios descompuestos de las diferentes unidades de obra consideradas en el estudio. Como ejemplo, se adjunta el precio descompuesto para una unidad equivalente a una tonelada de MB en caliente para una capa de rodadura y con un betún del tipo 50/70 (Figura 47).

t. Mezcla bituminosa en caliente tipo rodadura 50/70 S, con áridos con desgaste de los ángeles < 25, fabricada y puesta en obra, extendido y compactación, excepto filler de aportación y betún.						
Código	Ud.	Descripción Corta	Rend.	Precio	Total	
MO004	h.	Encargado	0.010	19.98	0.20	
MO003	h.	Oficial primera	0.010	19.86	0.20	
MO001	h.	Peón ordinario	0.030	16.88	0.51	
MQ006	h.	Pala cargadora neumáticos 85 CV/1,2m3	0.010	39.83	0.40	
MQ011	h.	Pta.asfált.calierte discontinua 160 t/h	0.010	332.21	3.32	
MQ004	h.	Camión basculante 4x4 14 t.	0.100	34.92	3.49	
MQ012	h.	Extended.asfáltica cadenas 2,5/6m.110CV	0.010	94.00	0.94	
MQ013	h.	Rodillo vibrante autoprop. tandem 10 t.	0.010	50.00	0.50	
MQ014	h.	Compactador asfált.neum.aut. 12/22t.	0.010	57.00	0.57	
MQ003	h.	Cisterna agua s/camión 10.000 l.	0.003	32.00	0.10	
MQ015	km	km/t transporte aglomerado	30.000	0.13	3.90	
MAT005	kg	Fuel-oil pesado 2,7 S tipo 1	8.000	0.49	3.92	
MAT015	t.	Arido machaqueo 0/6 D.A.<25	0.421	8.11	3.41	
MAT016	t.	Arido machaqueo 6/12 D.A.<25	0.249	7.63	1.95	
MAT017	t.	Arido machaqueo 12/18 D.A.<25	0.086	7.34	0.63	
MAT018	t.	Arido machaqueo 18/25 D.A.<25	0.163	7.22	1.18	
		3% Costes indirectos	3%		0.76	25.98 €

Figura 15 Precio descompuesto 1 tn de MB en caliente. Fuente: Hoja cálculo IECA.

#### 5.2.3.4. Ventajas y limitaciones

Tras realizar el análisis de la herramienta, se han identificado una serie de ventajas y limitaciones. Éstas son:

##### Ventajas

- Herramienta específica para firmes.
- Herramienta combinada (ACVF+CCVF).
- Uso libre, previo registro.
- Fácil manejo, herramienta intuitiva.
- Idioma español.
- Datos españoles.
- Guía breve de utilización.
- Cálculo para secciones de firmes flexibles, semirígidos y rígidos.
- Cálculos para diferentes períodos temporales.
- Etapa de construcción (procesado de materiales + puesta en obra).
- Etapas de mantenimiento/rehabilitación y conservación.
- Principales categorías de impacto (8).

- Resultados numéricos y gráficos.
- Resultados totales y parciales (por etapas y parte de la sección del firme).
- Se trata de una hoja abierta, pueden modificarse los datos de salida asociados a los impactos y costes.

#### Limitaciones

- En desarrollo.
- No considera la etapa de uso.
- No considera la etapa de fin de vida.
- No se detallan los subsistemas de cada etapa (por ejemplo, procesos para la obtención de la MB).
- Poca variabilidad en la introducción de datos de entrada. Por ejemplo, para las MB:
  - o No es posible introducir el tipo de betún.
  - o No es posible introducir el tipo de filler.
  - o No es posible introducir el tipo de árido.

### **5.2.4. Herramienta de evaluación ambiental del Gobierno de Aragón**

#### **5.2.4.1. Descripción general**

El Gobierno de Aragón ha desarrollado la *Herramienta de cálculo para el estudio ambiental de explanadas y firmes*, una herramienta específica de evaluación ambiental en pavimentación. Se trata de un programa para el análisis ambiental de las secciones de explanadas y firmes (ACVF), creado por Jorge Ortiz en el año 2015. Este mismo autor ya trabajó en la realización del proyecto AVACo (ver punto 4.2.1. AVACo y LCA-Abacus).

Se basa en una hoja de cálculo, en formato *Excel*, que permite el cálculo de los impactos ambientales asociados a las secciones de firme flexibles y rígidas, junto con diferentes tipos de explanada. Su descarga es libre y sin registro, desde el apartado de *Carreteras* del *Departamento de Vertebración, Territorio, Movilidad y Vivienda*, en la página web del Gobierno de Aragón (*aragon.es*, 2019).

Se desconoce el origen de los datos con los que trabaja, sin embargo, por ser una herramienta autonómica y por su autor, lleva a pensar que los datos han sido obtenidos a partir de bases de datos y empresas españolas, probablemente a partir de proyectos aragoneses.

El idioma de trabajo es el español, y a pesar de ser muy intuitiva, no dispone de guía ni documentos de soporte. Únicamente existe el documento *Manual Buenas Prácticas Medioambientales. CARRETERAS DE ARAGÓN*, también disponible *online*, dónde se describen acciones para la reducción de emisiones y gases de efecto invernadero.

Su unidad funcional es 1 m<sup>2</sup> de sección (explanada + firme). No obstante, se pueden calcular impactos de subsistemas con unidades diferentes, tal y como se comentará más adelante (*punto 5.2.4.3. Presentación de los resultados*).

Las etapas del sistema consideradas son únicamente la construcción, incluyendo el procesado de los materiales, la puesta en obra y el transporte, por lo que no contempla horizontes

temporales. Existe un documento complementario, también en formato *Excel*, la *Herramienta de cálculo para el estudio ambiental de soluciones de rehabilitación de firmes*, que permite el cálculo de los impactos asociados a diferentes actividades de rehabilitación superficial y estructural, es decir, lo que podría considerarse como etapa de mantenimiento.

#### 5.2.4.2. Modo de trabajo

##### Herramienta de cálculo para el estudio ambiental de explanadas y firmes:

En este punto, se enumeran los pasos que deben seguirse para realizar el estudio ambiental asociado a la etapa de construcción de la sección. Se realiza una explicación detallada de cada uno de ellos, completándola con imágenes de la herramienta para facilitar la comprensión.

##### 1. Tipo de suelo y categoría de tráfico:

El primero de los datos a introducir es el tipo de suelo, pudiendo escoger entre:

- Suelo inadecuado
- Suelo tolerable
- Suelo adecuado
- Suelo seleccionado
- Roca

Acto seguido, se selecciona una de las siguientes categorías de tráfico:

- T1
- T2 a/b/c
- T3 a/b/c
- T4 a/b

##### 2. Selección de materiales de explanadas:

Se eligen los materiales que conforman la explanada:

- Suelo seleccionado S3
- Suelo seleccionado S4
- Suelo estabilizado S-EST 1
- Suelo estabilizado S-EST 2
- Suelo estabilizado S-EST 3
- Riego de curado

Una vez se escoge el tipo de material de la explanada, deben introducirse una serie de datos para una unidad funcional equivalente a 1 m<sup>3</sup> de explanada. Dependiendo del material de la explanada, los inputs son diferentes.

A modo de ejemplo, se muestra en la imagen (*Figura 48*) los datos que deben introducirse en el programa en el caso de una explanada de suelo estabilizado tipo S-EST1.

2. SUELO ESTABILIZADO TIPO S-EST1  
UNIDAD FUNCIONAL: m<sup>3</sup> de CAPA CONSTRUIDA

MENU DE INTRODUCCIÓN DE DATOS

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO:

VARIABLES

PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTOS Y TRASNPOTES DE MP A OBRA

p<sub>1</sub>  % Proporción de suelo de aportación

p<sub>2</sub>  % Proporción conglomerante (p.p.d., p<sub>2</sub>=3,0% cal/cemento ó p<sub>2</sub>=4% cal hidratada)

d<sub>1</sub>  km Distancia zona de obtención de suelo de aportación hasta la obra

d<sub>2</sub>  km Distancia desde la zona de obtención del conglomerante hasta la obra

D<sub>c</sub>  t/m<sup>3</sup> Densidad de la capa construida (p.p 1.90 t/m<sup>3</sup>)

PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): EJECUCIÓN EN OBRA Y TERMINACIÓN

R<sub>2</sub>  m<sup>3</sup>/d Rendimiento ejecución de obra (propuesta por defecto, R<sub>2</sub>=1.000 m<sup>3</sup>/día)

DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CONGLOMERANTE

T  Conglomerante hidráulico utilizado

Figura 16 Introducción de datos explanada S-EST1. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

Para un mismo tipo de material de explanada, se pueden calcular hasta un máximo de cuatro alternativas, cada una de ellas con *inputs* diferentes (Figura 49).

VARIABLES UTILIZADAS EN LAS ALTERNATIVAS ESTUDIADAS

	prueba A1 VARIABLES	prueba 2 A2 VARIABLES	prueba 3 A3 VARIABLES	prueba 4 A4 VARIABLES	
p <sub>1</sub>	<input type="text" value="15.00"/>	<input type="text" value="25.00"/>	<input type="text" value="25.00"/>	<input type="text" value="25.00"/>	p <sub>1</sub>
p <sub>2</sub>	<input type="text" value="3.00"/>	<input type="text" value="3.00"/>	<input type="text" value="4.00"/>	<input type="text" value="4.00"/>	p <sub>2</sub>
d <sub>1</sub>	<input type="text" value="20.00"/>	<input type="text" value="20.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	d <sub>1</sub>
d <sub>2</sub>	<input type="text" value="40.00"/>	<input type="text" value="40.00"/>	<input type="text" value="20.00"/>	<input type="text" value="20.00"/>	d <sub>2</sub>
D <sub>c</sub>	<input type="text" value="1.90"/>	<input type="text" value="1.90"/>	<input type="text" value="1.90"/>	<input type="text" value="2.00"/>	D <sub>c</sub>
R <sub>2</sub>	<input type="text" value="1,000.00"/>	<input type="text" value="1,000.00"/>	<input type="text" value="1,000.00"/>	<input type="text" value="1,000.00"/>	R <sub>2</sub>
T	<input type="text" value="Cemento"/>	<input type="text" value="Cemento"/>	<input type="text" value="Cal apagada"/>	<input type="text" value="Cal apagada"/>	T
	A1	A2	A3	A4	

Figura 17 Alternativas para un mismo tipo de explanada S-EST1. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

Para volver al menú principal se debe seleccionar una de las cuatro alternativas. Existe la opción de imprimir los resultados de las alternativas. De lo contrario, al volver al menú principal se conservan únicamente aquellos valores precisos para cálculos posteriores. Este mismo procedimiento puede realizarse para distintos tipos de suelo, pudiendo comparar los resultados de los impactos asociados a la explanada para diferentes tipos de material.

### 3. Selección de explanadas:

El programa considera las tres categorías de explanada, en función del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E<sub>v2</sub>) (Tabla 4), como:

- Explanada EX1
- Explanada EX2
- Explanada EX3

Tabla 4 Módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga. Fuente: Norma 6.1-IC.

Categoría explanada	EX1	EX2	EX3
Ev2 [MPa]	≥ 60	≥ 120	≥ 300

Una vez se ha seleccionado el tipo de suelo, el programa presenta para las diferentes categorías de explanada, las posibles secciones con los espesores y los materiales de la explanada. Por ejemplo, en la imagen (Figura 50) se muestran las diferentes alternativas de explanada en el caso de tener un suelo tolerable.











RED AUTONÓMICA ARAGONESA		SUELOS TOLERABLES			
CATEGORÍA DE LA EXPLANADA		Alternativa 1 A1	Alternativa 2 A2	Alternativa 3 A3	Alternativa 4 A4
	EX 1 (BAJA)	 30 cm S0 EX1 S3	 25 cm S0 EX1 S4	 25 cm S0 EX1 S-EST1	 20 cm S0 EX1 S-EST2
	EX 2 (MEDIA)	 60 cm S0 EX2 S3	 50 cm S0 EX2 S4	 30 cm S0 EX2 S-EST3	 18 cm S-EST 2 20 cm S0 EX2 S-EST2
	EX 3 (ALTA)	 30 cm S4 25 cm S0 EX3 S4 S-EST3	 25 cm S-EST 2 20 cm S0 EX3 S-EST2-3		

Figura 18 Alternativas de explanada para suelo tolerable. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

Se escoge la alternativa de explanada con la que se quiera trabajar y la herramienta facilita los resultados de esa selección.

#### 4. Selección de materiales de firme:

Entre los materiales de firme disponibles se encuentran:

- Zahorra
- Suelocemento in situ
- Suelocemento en central
- Riego de imprimación
- Riego de adherencia
- MBC segunda capa bajo rodadura
- MBC primera capa bajo rodadura
- MBC capa de rodadura
- GE-MAF primera capa bajo rodadura
- MAF frío capa de rodadura
- Tratamiento superficial de riego con gravilla
- Microaglomerado en frío
- Hormigón magro vibrado
- Hormigón de firmes

Del mismo modo que en el caso de la explanada, deben introducirse, para los tipos de material que se deseen analizar, una serie de datos de entrada. Supóngase el caso de trabajar con mezclas

bituminosas fabricadas en caliente. Los *inputs* en la capa de rodadura, para una unidad de 1 tonelada de capa construida, son los de la imagen adjunta (*Figura 51*).

7.1 MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE EN  
UNIDAD FUNCIONAL: t de CAPA CONSTRUIDA

CAPA DE RODADURA

**MENU DE INTRODUCCIÓN DE DATOS**

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO/SELECCIONADA:

**VARIABLES**

<b>PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTO Y TRANSPORTE DE MP</b>	
$T_M$ <input type="text"/>	Tipo de mezcla bituminosa
$T_B$ <input type="text"/>	Tipo de betún
$p_1$ <input type="text" value="#N/A"/>	% Proporción de áridos de machaqueo
$p_2$ <input type="text" value="#N/A"/>	% Proporción de polvo mineral calizo
$p_3$ <input type="text"/>	% Proporción de materiales procedentes de fresado de MBC ( $p_3 \leq 15\%$ )
$p_4$ <input type="text" value="#N/A"/>	% Proporción de betún
$d_1$ <input type="text"/>	km Distancia de la zona de obtención ár. machaqueo a central de fabricación
$d_2$ <input type="text"/>	km Distancia de obtención polvo mineral calizo a la central de fabricación
$d_3$ <input type="text"/>	km Distancia de obtención fresado de MBC hasta la central de fabricación
$d_4$ <input type="text"/>	km Distancia de obtención del betún hasta la central de fabricación
<b>PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): FABRICACIÓN EN CENTRAL</b>	
$R_2$ <input type="text"/>	t/día Producción media de la central (p.p.d., $R_2=800$ t/día)
<b>PROCESO UNITARIO 3 (PU 3): TRANSPORTE A OBRA</b>	
$d_0$ <input type="text"/>	km Distancia desde la central a la obra
<b>PROCESO UNITARIO 4 (PU 4): PUESTA EN OBRA</b>	
$R_4$ <input type="text"/>	t/día Rendimiento de puesta en obra (p.p.d., $R_4=800$ t/día)

Figura 19 Introducción de datos MBC capa de rodadura. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

Puede observarse cómo los procesos unitarios o subetapas del ciclo de vida consideradas hacen referencia a la obtención de los materiales y su procesado, al transporte y a la puesta en obra.

En la misma línea, existe la posibilidad de calcular cuatro alternativas diferentes para poder comparar los resultados. Tras la selección de una de ellas, la herramienta permite estudiar, para el caso de MBC, opciones con estas tres mezclas especiales:

- MBC con NFU vía húmeda
- MBC con adición de caucho vía seca
- MBC semicaliente o templada

Se introducen otra vez los *inputs* de la mezcla especial y el programa muestra los resultados, comparando la de tipo convencional con ésta última.

##### 5. Selección de explanada + firme:

Finalmente, el último paso es el cálculo de la combinación de explanada y firme.

Herramienta de cálculo para el estudio ambiental de soluciones de rehabilitación de firmes:

Tal y como se ha comentado, existe otra herramienta para el cálculo de las cargas ambientales asociadas a las operaciones de mantenimiento. Los pasos que deben seguirse son:

##### 1. Tipo de proyecto:

El primero de los pasos es la elección del tipo de proyecto, ya sea:

- Rehabilitación estructural
- Rehabilitación superficial

## 2. Selección de materiales y actuaciones:

En el caso de escoger realizar actuaciones de rehabilitación estructural, las distintas opciones que ofrece el programa son:

- Zahorra
- Fresado de capas bituminosas
- Reciclado con cemento
- Reciclado con emulsión
- Riego de curado
- Riego de imprimación
- Riego de adherencia
- MBRC segunda capa bajo rodadura
- MBRC primera capa bajo rodadura
- MBC segunda capa bajo rodadura
- MBC primera capa bajo rodadura
- MBC capa de rodadura
- GE – MAF primera capa bajo rodadura
- MAF frío capa de rodadura
- Microaglomerado en frío capa superior
- Hormigón de firmes

Donde el término *MBRC* hace referencia a *Morteros de Baja Resistencia Controlada*, *GE* a *Grava Emulsión* y *MAF* a *Mezclas Abiertas en Frío*.

Si el tipo de actuación o actividad de mantenimiento es de rehabilitación superficial, se puede escoger entre:

- Riego de adherencia
- MBRC primera capa bajo rodadura
- MBC primera capa bajo rodadura
- MBC capa de rodadura
- GE – MAF primera capa bajo rodadura
- MAF frío capa de rodadura
- Tratamiento superficial riego con gravilla
- Microaglomerado en frío capa inferior
- Microaglomerado en frío capa superior

Para todos los tipos de actuación, ya sean estructurales o superficiales, deben introducirse una serie de datos de entrada para cada unidad funcional.

## 3. Selección de la solución de rehabilitación:

Una vez definidas las actuaciones, se selecciona la solución final de rehabilitación, proporcionándose los resultados totales de los impactos. Entre las posibles soluciones de tipo superficial se encuentran:

- Rehabilitación superficial con mezclas bituminosas
- Rehabilitación superficial con micraglomerados



- Rehabilitación superficial con riegos con gravilla

Entre las posibles soluciones de tipo estructural se encuentran:

- Reciclado *in situ* con cemento
- Reciclado *in situ* con emulsión
- Eliminación, reposición y recrecimiento con mezclas bituminosas
- Recrecido con hormigón

En todas ellas se debe introducir el espesor de la capa [cm] y la superficie de aplicación [%].

### 5.2.4.3. Presentación de los resultados

Herramienta de cálculo para el estudio ambiental de explanadas y firmes:

Los resultados se muestran numérica y gráficamente, para las siguientes cinco categorías de impacto:

- MPp [kg]: Materias Primas pétreas
- MPnp [kg]: Materias Primas no pétreas
- DEA [kWh]: Demanda Acumulada de Energía
- ICC [kg CO<sub>2</sub> eq.]: Indicador de Cambio Climático
- RMP [kg]: Residuos usados como Materias Primas

Los valores numéricos se muestran en valores absolutos y en valores relativos, en función de las alternativas analizadas (*Figura 52*). Estos resultados se generan para la UF estudiada, ya sea del firme, de la explanada o de la combinación firme y explanada. Se muestran los resultados totales asociados a la UF, sin que sea posible conocer la contribución de cada una de las subetapas.

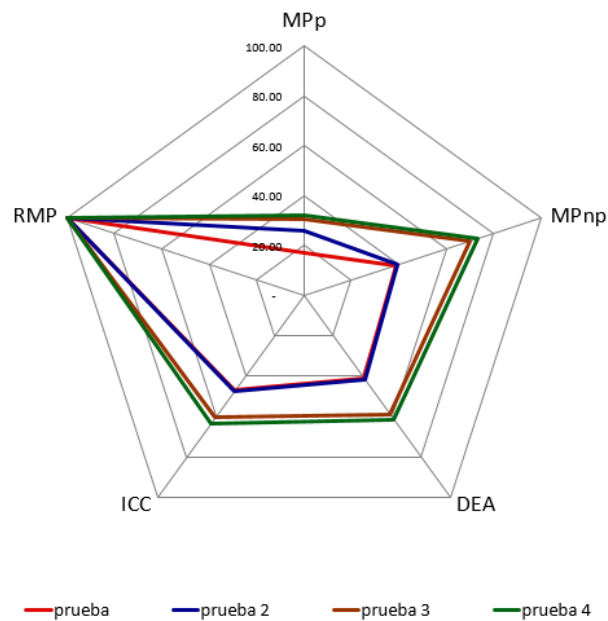
RESULTADOS ABSOLUTOS		INDICADORES				
		MPp	MPnp	DEA	ICC	RMP
		kg	kg	kWh	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg
DESCRIPCIÓN		RESULTADOS				
Valores máximos	VMAX	2,490.00	22.10	203.00	121.00	-
Valores mínimos	-	-	-	-	-	- 195.00
prueba	A1	431.18	8.60	82.98	57.01	-
prueba 2	A2	640.18	8.74	84.57	57.41	-
prueba 3	A3	765.00	15.52	119.52	73.06	-
prueba 4	A4	805.26	16.25	124.84	76.66	-

RESULTADOS RELATIVOS		INDICADORES				
		MPp	MPnp	DEA	ICC	RMP
		kg	kg	kWh	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg
DESCRIPCIÓN		RESULTADOS				
Valores máximos	VMAX	100.00	100.00	100.00	100.00	-
Valores mínimos	-	-	-	-	-	- 100.00
prueba	A1	17.32	38.93	40.88	47.12	100.00
prueba 2	A2	25.71	39.54	41.66	47.44	100.00
prueba 3	A3	30.72	70.21	58.88	60.38	100.00
prueba 4	A4	32.34	73.54	61.50	63.35	100.00

Figura 20 Resultados numéricos de las alternativas estudiadas. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

Los resultados gráficos son en forma de gráfico radial (*Figura 53*), permitiendo la comparación sobre un mismo dibujo de todas las alternativas y categorías de impacto. Este hecho facilita enormemente el análisis de los resultados obtenidos.



*Figura 21 Resultados gráficos de las alternativas estudiadas. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.*

#### Herramienta de cálculo para el estudio ambiental de soluciones de rehabilitación de firmes:

Esta segunda hoja de cálculo muestra los resultados del mismo modo que en el caso anterior. Se presentan, para las cinco categorías de impacto, los valores numéricos (absolutos y relativos) y los resultados gráficos de las diferentes alternativas analizadas, permitiendo su comparación. Los resultados se muestran individualmente, para cada tipo de actuación, y como total, concentrando la suma de todas las operaciones de rehabilitación seleccionadas.

#### **5.2.4.4. Ventajas y limitaciones**

Esta herramienta presenta una serie de ventajas y limitaciones, pudiendo resumirse en:

##### Ventajas

- Herramienta específica para firmes y explanadas.
- Uso libre, sin registro previo.
- Fácil manejo, herramienta intuitiva.
- Idioma español.
- Cálculo para todo tipo de secciones de la Norma 6.1-IC.
- Etapa de construcción (procesado de materiales + puesta en obra + transporte).
- Etapa de mantenimiento/rehabilitación (estructural y superficial).
- Gran variabilidad en la introducción de datos de entrada, variando con el material.
- 5 categorías de impacto.
- Permite el cálculo de 4 alternativas.
- Resultados numéricos y gráficos.
- Resultados en valores absolutos y relativos.

### Limitaciones

- No permite el CCVF.
- Desconocimiento del origen de los datos.
- No dispone de guía de uso.
- No considera horizontes temporales.
- No considera la etapa de uso.
- No considera la etapa de fin de vida.
- Resultados totales, no se muestran divididos en los subsistemas de cada etapa.
- Se trata de una hoja cerrada, no pueden modificarse los datos de salida asociados a los impactos.

## 5.2.5. HueCO<sub>2</sub>

### 5.2.5.1. Descripción general



La herramienta informática *HueCO<sub>2</sub>* ha sido creada por *Tecniberia (Asociación Española de Empresas de Ingeniería, Consultoría y Servicios Tecnológicos)*, junto con otras empresas colaboradoras y el apoyo de la *Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*. Permite, básicamente, el cálculo de la huella de carbono de la construcción de una obra pública en España, con una precisión de al menos el 80% (*hueco2.tecniberia.es*, 2019). La huella de carbono se obtiene al sumar la totalidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), calculadas como:

$$\text{Emisiones de GEI} = \text{Datos de la actividad} \times \text{Factor de emisión}$$

*HueCO<sub>2</sub>* consiste en un documento, en formato *Excel*, que incluye una base de datos con unos 200 factores de emisión (FE) específicos del sector de construcción de carreteras. Estos datos provienen de otras bases de datos y estudios de ACV, cumpliendo con los criterios de la Norma ISO 14.064. Siempre que ha sido posible, los datos han sido seleccionados de estudios españoles. Se recogen el 90% de los productos y actividades más representativas de la obra, agrupándose en las siguientes cuatro categorías (*Figura 54*):

- Materiales
- Maquinaria
- Transporte
- Energía (Diesel, Fuel oil, Electricidad y Gas Natural)

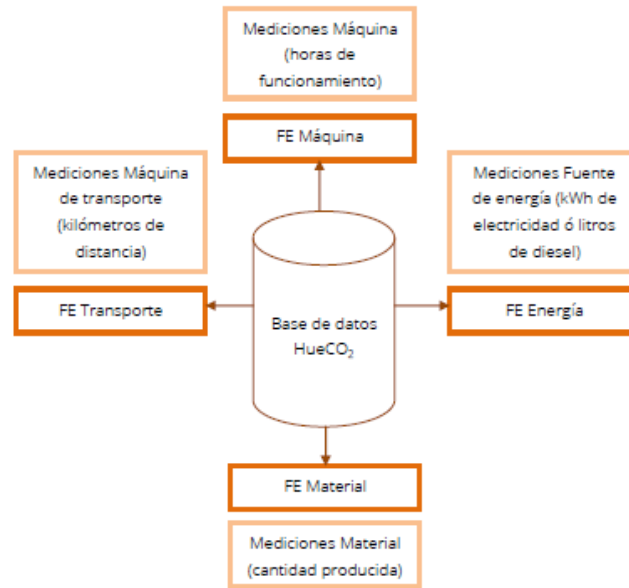


Figura 54 Categorías de HueCO<sub>2</sub>. Fuente: Guía de HueCO<sub>2</sub>.

Cada FE tiene asociado un grado de incertidumbre, generándose una matriz de incertidumbre, y finalmente, se aplica un grado de incertidumbre a las emisiones totales.

La herramienta, en idioma español, es de uso libre y se encuentra disponible en la página web una vez realizado el registro. Adicionalmente, es posible la descarga de una guía de usuario, dónde se explica todo lo necesario para poder calcular la huella de carbono, y de una plantilla con un informe tipo.

La base de datos se actualiza frecuentemente e incluso se puede proporcionar datos propios de cálculos de huellas de carbono de maquinaria o materiales, que en caso de ser validados por el Comité Técnico de Expertos, se añaden a la *BBDDs*. En la página web también se encuentra disponible un foro donde los usuarios pueden poner en común sus conocimientos.

No se trata propiamente de una herramienta para la evaluación ambiental de diferentes etapas del ACVF; más bien consiste en una base de datos que permite el cálculo de una categoría de impacto, concretamente las emisiones de efecto invernadero, para la fase o etapa de construcción. Es decir, los resultados que se obtienen son los quilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente [kg CO<sub>2</sub> eq], para cada una de las cuatro categorías y el total (*punto 5.2.5.3. Presentación de los resultados*).

#### 5.2.5.2. Modo de trabajo

Los documentos con los que se debe trabajar son dos:

- Hoja *Excel*: base de datos.
- Documento *Word*: plantilla informe.

En el documento *Excel* se encuentra disponible una tabla incluyendo el código, categoría (materiales [MT], maquinaria [MQ], transporte [T] y energía [E]), unidad, denominación, factor de emisión, unidades del FE y su grado de incertidumbre asociado (*Tabla 5*).

Tabla 5 Ejemplos de la BBDD de HueCO<sub>2</sub>. Fuente: Hoja Excel HueCO<sub>2</sub>.

Código	Categoría	Unidad	Denominación	Factor de Emisión	Unidades	Grado de certidumbre
HUE.E.1.3	E	kWh	Electricidad (alcance 2)	0,399	kg CO <sub>2</sub> eq / kWh	1
HUE.E.1.8	E	L	Fuel Oil (alcance 3)	0,209	kg CO <sub>2</sub> eq / L	1,75
HUE.MQ.6.1	MQ	h	Camión/Dumper 25 kW de 1-3 t	6,68	kg CO <sub>2</sub> eq / h	1,75
HUE.MQ.8.16	MQ	h	Planta asfáltica en caliente 120 t/h	1,919,659	kg CO <sub>2</sub> eq / h	3
HUE.MQ.8.17	MQ	h	Planta asfáltica en caliente 160 t/h	2,558,212	kg CO <sub>2</sub> eq / h	1,5
HUE.MT.08.2	MT	t	Mezclas semicaliente	42,51	kg CO <sub>2</sub> eq / t	1,25
HUE.MT.08.3	MT	t	Mezcla templada con betún	39,02	kg CO <sub>2</sub> eq / t	1
HUE.MT.8.6	MT	t	Mezcla Bituminosa en caliente (con filler de aportación: 2% cemento)	73,166	kg CO <sub>2</sub> eq / t	1
HUE.T.1.1	T	t.km	Camión de transporte general	0,122	kg CO <sub>2</sub> eq / t.km	1,25

El valor asociado al grado de incertidumbre se asigna en función de los cuatro criterios recogidos en la tabla siguiente (Tabla 6), calculando la media entre los diferentes elementos que componen la unidad.

Tabla 6 Sistema de puntuación del grado de incertidumbre. Fuente: Guía de HueCO<sub>2</sub>.

Puntuación	Criterios			
	Fuente	Correlación Geográfica	Fecha	Metodología de cálculo
1	Reconocida y fiable en el sector	Nacional	< 5 años	Metodología reconocida (ISO 14040/64, PAS 2050, WBCSD/WRI GHG, ACV, IPCC Guidelines, DEFRA/DECC Guidelines, Bilan Carbone, etc.
2	Reconocida y fiable en general	Europeo	5-10 años	Metodología propia validada / verificada por un organismo externo y independiente.
3	Poco reconocida y fiable	Global / Internacional	> 10 años	Metodología propia no reconocida ni verificada. Elaboración propia de HueCO <sub>2</sub> .

El documento *Word* incluye un formato de plantilla estándar, con todos los pasos a seguir y las tablas que hay que ir rellenando para obtener la huella de carbono (HC) de cualquier proyecto. Estos pasos son:

1. Recopilación de todos los elementos de maquinaria y materiales.

En este punto deben seleccionarse, de la base de datos, aquellas unidades de obra necesarias, introduciendo su cantidad y unidades.

2. Asignación del factor de emisión HueCO<sub>2</sub> a cada elemento.

De las unidades de obra seleccionadas, se introducen los factores de emisión y el grado de incertidumbre asociado a cada una de ellas.

A modo de ejemplo simplificado para entender mejor la herramienta, se adjuntan la tabla (Tabla 7) con el inventario para la fabricación de una tonelada de MB. En este caso se han considerado únicamente dos de las cuatro categorías, maquinaria y materiales. En el caso de la maquinaria, únicamente se ha considerado la planta asfáltica, una extendedora con un rendimiento de 500 Tn/h y que la planta se encuentra a media hora de trayecto hasta la obra. En el caso de los materiales, sólo se tiene la tonelada de mezcla. Los elementos se han escogido de la base de datos de HueCO<sub>2</sub>, calculándose la cantidad necesaria de todos ellos.

Tabla 7 Inventario simplificado para 1 tn de mezcla bituminosa. Fuente: HueCO<sub>2</sub>.

Elemento				
MAQUINARIA	CANTIDAD	Ud	FE	Grado Incert.
Planta asfáltica en caliente 120 t/h	0.00833	h	1919659	3
Camión basculante 85 kW (115 CV) 4-6 m <sup>3</sup> 6 t	0.5	h	22239	1.5
Extendedora asfáltica de cadenas anchura 2,5 - 5 m 100-130 kW (140-175 cv)	0.002	h	30455	2

Elemento				
MATERIALES	CANTIDAD	Ud	FE	Grado Incert.
Mezcla Bituminosa en caliente (con filler de aportación: 2% cal)	1	t	80432	1

3. Multiplicación de la cantidad de cada elemento por su factor de emisión HueCO<sub>2</sub> correspondiente, sumatorio de las emisiones y resultado de la huella de carbono.

En esta fase, se debe multiplicar la cantidad de cada unidad de obra por su factor de emisión. A continuación, se suman las unidades y se obtienen los resultados de la HC por categoría.

4. Cálculo del grado de incertidumbre asociado: media ponderada.

El siguiente paso consiste en la multiplicación de cada grado de incertidumbre por la huella de carbono de la unidad de obra correspondiente, dividiéndolo por la huella de carbono total.

5. Cálculo del rango de la huella de carbono resultante.

En función del resultado del punto 4, se asigna un rango de incertidumbre asociado a la HC. Los valores de este porcentaje pueden variar entre (Figura 55):

Siguiendo la matriz de incertidumbre:	
Mayor o igual a 1 y menor de 1,5	5%
Mayor o igual a 1,5 y menor de 2	10%
Mayor o igual a 2 y menor o igual a 3	20%

Figura 22 Rango de incertidumbre. Fuente: Guía de HueCO<sub>2</sub>.

## 6. Lista de elementos excluidos.

Se genera una lista con los elementos más representativos y se designan aquellos sin factor de emisión asignado. Los elementos más representativos son aquellos cuya dimensión agregada forma parte del 90% agregado de la totalidad de magnitudes de los elementos empleados, ordenados en orden decreciente y sin distinción entre sus unidades.

Estas listas sirven para que, en caso de trabajar con proyectos con numerosas unidades de obra, se pueda tener conocimiento de aquéllas que contribuyen significativamente a la emisión de GEI y, por el contrario, las unidades cuya contribución es prácticamente despreciable. Puede verse en la imagen parte de la lista del ejemplo de un proyecto tipo que se encuentra en la guía de uso de HueCO<sub>2</sub> (Figura 56).

Elemento	CANTIDAD	Ud	Cantidad acumulada	Acumulado %
<b>MAQUINARIA</b>				
Desplazamiento equipo 5000tm M.B.	451.798,75	ud	451.798,75	43,74
Accesorios de perforación.	99.767,64	ud	551.566,39	53,40
Canon tierras de préstamos	96.726,69	m3	648.293,08	62,77
Camión con caja basculante 4 x 4.	59.995,50	h	708.288,58	68,57
Regla vibrante de 8 Kw.	33.092,40	h	741.380,98	71,78
Compresor de 5 m3/min.	31.543,06	h	772.924,04	74,83
Camión con caja fija y grúa de 6 Tm.	27.059,18	h	799.983,22	77,45
Motoniveladora de 100 Kw.	13.999,90	h	813.983,12	78,81
Barredora remolcada c/motor auxiliar	13.839,46	h	827.822,58	80,15
Camión con tanque para agua de 10 m3	13.576,47	h	841.399,05	81,46
Compactador de neumáticos autopropulsado de 7 ruedas.	12.995,36	h	854.394,41	82,72
Camión basculante 4x4 14 t.	11.411,36	h	865.805,77	83,82
Pala cargadora sobre cadenas de 2 a 3,5 m3.	10.721,99	h	876.527,76	84,86
Compactador vibratorio autopropulsado de 7 Tm.	10.337,76	h	886.865,52	85,86
Camión cist.bitum.c/lanza 10.000 l.	8.297,62	h	895.163,14	86,67
Camión hormigonera de 6 m3.	8.295,50	h	903.458,64	87,47
Carro perforador neumático sobre cadenas.	7.995,35	h	911.453,99	88,24
Cisterna agua s/camión 10.000 l.	7.933,59	h	919.387,58	89,01
Furgón transporte.	7.664,94	h	927.052,52	89,75
Central de machaqueo y cribado.	7.563,74	h	934.616,26	90,49
Pta.asfált.caliente discontinua 160 t/h	7.542,29	h	942.158,55	91,22
Extended.asfáltica cadenas 2,5/6m.110CV	7.542,29	h	949.700,84	91,95
Compactador asfált.neum.aut. 12/22t.	7.542,29	h	957.243,13	92,68
Pala cargadora neumáticos 85 CV/1,2m3	7.542,29	h	964.785,42	93,41

Figura 23 Lista de elementos excluidos. Fuente: Guía de HueCO<sub>2</sub>.

### 5.2.5.3. Presentación de los resultados

Los resultados se presentan de un modo bastante simplificado. Se obtiene, mediante una tabla, la huella de carbono asociada a cada una de las categorías y el valor total en formato numérico.

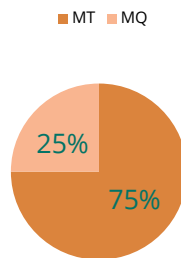
Siguiendo con el ejemplo simplificado anterior para la fabricación y puesta en obra de 1 tonelada de mezcla, se obtiene en kg de CO<sub>2</sub> equivalente:

Tabla 8 Resultados numéricos de la HC. Fuente: HueCO<sub>2</sub>.

Resultados: Huella de carbono (kgCO <sub>2</sub> eq)		
MAQUINARIA	MATERIALES	Huella de carbono TOTAL
27171.17	80432	107603.17

Los resultados gráficos se representan mediante un gráfico de sectores, donde se representa la parte porcentual de contribución de cada categoría a la huella de carbono total (*Figura 57*).

**Cálculo de la huella de carbono**



*Figura 24 Resultados gráficos de la HC. Fuente: HueCO<sub>2</sub>.*

Además, se obtienen un rango de incertidumbre que debe aplicarse al valor total de la huella. En el ejemplo anterior, se obtiene que el grado de incertidumbre es 1,35, lo que equivaldría según los valores de la *Figura 55* a una incertidumbre del 5%. Por lo que los resultados finales de la HC serían los de la *Tabla 8*  $\pm 5\%$ .

#### 5.2.5.4. Ventajas y limitaciones

Las ventajas y limitaciones que se han encontrado son:

##### Ventajas

- Herramienta para cualquier tipo de proyecto de obra.
- Uso libre, previo registro.
- Fácil manejo.
- Idioma español.
- Gran cantidad de unidades de obra, más de 200 datos.
- Actualización periódica.
- Etapa de construcción (procesado materiales + puesta en obra + transporte).
- Resultados numéricos y gráficos.
- Indica el grado de incertidumbre asociado.
- Dispone de guía de uso.
- Dispone de un foro para usuarios en la *web*.

##### Limitaciones

- No permite el CCVF.
- No considera la etapa de mantenimiento/rehabilitación.
- No considera la etapa de uso.
- No considera la etapa de fin de vida.
- Una única categoría de impacto (emisiones GEI).
- No considera horizontes temporales.



## 5.2.6. Eurobitume

### 5.2.6.1. Descripción general

*Eurobitume* publicó, en julio de 2012, la segunda edición de “*Life Cycle Inventory (LCI): Bitumen*”, que más que una herramienta de ACVF, consiste en un inventario (ICV) muy completo sobre la producción de betunes. En la actualidad, se considera un documento de referencia en los trabajos de ACV de mezclas o productos asfálticos para firmes.

Se trata de una base de datos, en formato *Excel*, que permite conocer los costes ambientales asociados a la producción de betunes, incluyendo también, betunes modificados con polímeros y emulsiones bituminosas.

*Eurobitume* es una herramienta de uso libre sin registro y ámbito europeo, cuya descarga es posible desde la propia página *web* del organismo (*eurobitume.eu*, 2019). El idioma de trabajo es el inglés y, además del ICV, se proporciona un documento guía. Este último, más que tratarse de una guía de uso, consiste en una explicación de cómo se ha realizado la BBDDs. Se incluye la descripción de la unidad funcional, los límites del sistema con los procesos considerados, las fuentes de datos y la realización del inventariado para los diferentes tipos de betún analizados.

Los datos han sido recopilados de diferentes empresas petrolíferas miembro de *Eurobitume*, compañías de oleoductos, la compañía de transportes marítimos *Neste Oil Shipping* y otros organismos como la *International Association of Oil & Gas Producers (OGP)* o la *Association for the Conservation of Clean Air and Water in Europe (CONCAWE)*.

Por último, la unidad funcional es una tonelada de betún y las etapas que se incluyen son:

- La extracción del petróleo en crudo.
- El transporte a Europa, incluyendo el transporte en barco y por tierra (oleoductos).
- La fabricación del betún.
- El almacenaje en caliente del producto.
- La construcción de las infraestructuras para su fabricación.

Es decir, se trata de un sistema de la cuna a la puerta (*cradle to gate*) (Figura 58).

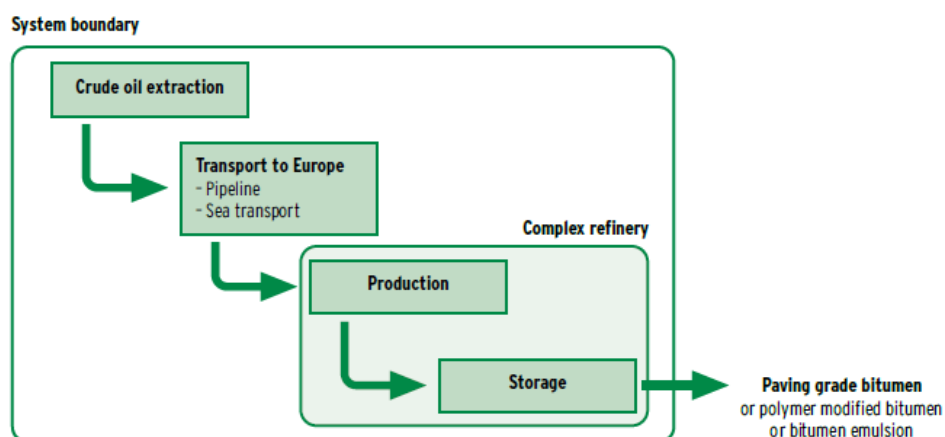


Figura 58 Límites del sistema en Eurobitume. Fuente: Eurobitume.

### 5.2.6.2. Modo de trabajo

Tal y como se ha comentado, *Eurobitume* no es propiamente una herramienta de evaluación ambiental, sino más bien un inventario o base de datos. Por este motivo, no es necesario seguir una serie de pasos para obtener los resultados finales.

Su uso es mucho más simple, en el documento *Excel* se encuentran agrupados los datos en función del tipo de betún analizado, que son:

- Betún sin infraestructuras.
- Betún con infraestructuras.
- Betún modificado con polímeros (PMB) sin infraestructuras.
- PMB con infraestructuras.
- Emulsión sin infraestructuras.
- Emulsión con infraestructuras.

Dónde el término infraestructuras se refiere a las infraestructuras necesarias para la producción, transporte y refino del petróleo.

En la *Hoja: ecoinvent format LCI* se presenta un inventario muy detallado con todos los elementos considerados y sus impactos asociados. A modo de resumen, se presenta en la *Hoja: short LCI* los impactos agrupados en diferentes categorías y para cada una de las etapas, también para los 6 tipos de betún considerados (*Figura 59*).

BITUMEN WITHOUT INFRASTRUCTURES ← Tipo de betún						
Etapas						
Production of 1 tonne of bitumen (process without infrastructure)	Unit	Crude oil extraction	Transport	Refinery	Storage	Total
<b>Raw material</b>						
Crude oil	kg	1000				1000
<b>Consumption of energy resources</b>						
Natural gas	kg	18.9	0.4	0.58	0.19	20.1
Crude oil	kg	17.5	9.3	11.9	2.2	40.9
Coal	kg	0.21	0.21	0.49	0.33	1.03
Uranium	kg	0.00001	0.00001	0.00003	0.00002	0.0001
<b>Consumption of non energy resources</b>						
Water <sup>1</sup>	l	48	48	72	24	143
<b>Emissions to air</b>						
CO <sub>2</sub>	g	99,135	30,078	37,200	7,831	174,244
SO <sub>2</sub>	g	290	334	130	27	781
NO <sub>x</sub>	g	270	436	52	11	770
CO	g	524	70	16	3	613
CH <sub>4</sub>	g	548	16	25	6	595
Hydrocarbon	g	0.015	4.6	3.5	38.7	46.8
NMVOOC	g	297	15	15	3	331
Particulates	g	132.6	12.7	12.6	3.4	161.2
<b>Emissions to water</b>						
Chemical Oxygen Demand	g	130	130	176	30	336
Biological Oxygen Demand	g	128	128	166	30	324
Suspended solids	g	9.4	9.4	16.4	4.1	30.0
Hydrocarbon	g	6.9	40.9	52.5	9.5	109.8
Phosphorous compounds	g	2.52	2.52	6.77	4.79	14.1
Nitrogen compounds	g	0.95	0.95	4.40	1.51	6.86
Sulphur compounds	g	63.2	63.2	165.9	119.0	348.1
<b>Emissions to soil</b>						
Hydrocarbon (oils)	g	8.1	42.6	54.9	10.0	116

Figura 25 Ejemplo del ICV de Eurobitume. Fuente: Eurobitume.

### 5.2.6.3. Presentación de los resultados

Como se ha podido observar en la figura anterior (*Figura 59*), los resultados que presenta *Eurobitume* se agrupan en afecciones a los recursos naturales, consumo de energía (dividido por

fuentes) y de recursos no energéticos y emisiones al aire, agua y suelo. Además, estas categorías se detallan en:

- Recursos (materias primas):
  - Petróleo
- Consumo de recursos energéticos:
  - Gas natural
  - Petróleo
  - Carbón
  - Uranio
- Consumo de recursos no energéticos:
  - Agua
- Emisiones al aire:
  - CO<sub>2</sub>
  - SO<sub>2</sub>
  - NOX
  - CO
  - CH<sub>4</sub>
  - Hidrocarburos
  - NMVOC
  - Partículas
- Emisiones al agua:
  - Demanda Química de Oxígeno
  - Demanda Biológica de Oxígeno
  - Sólidos en suspensión
  - Hidrocarburos
  - Fosfatos
  - Nitratos
  - Sulfatos
- Emisiones al suelo:
  - Hidrocarburos (aceites)

En resumen, un total de 16 categorías de impacto agrupadas en tres tipos de emisiones, según el medio de afectación. Todos estos resultados se expresan en gramos/tonelada de betún.

#### **5.2.6.4. Ventajas y limitaciones**

Las ventajas y limitaciones que se han encontrado son:

##### Ventajas

- Inventario muy detallado.
- Uso libre, sin registro.
- Idioma inglés.
- Datos de calidad, empresas del sector más importantes.
- Etapa de fabricación y transporte (cuna a puerta).

- Resultados numéricos.
- 6 categorías de impacto, subdivididas en múltiples componentes.
- Dispone de documento de soporte.
- Sirve como ayuda para la realización de ACVF.

#### Limitaciones

- Únicamente datos de betunes.
- No permite el ACVF ni CCVF.
- No proporciona resultados en formato gráfico.
- Únicamente considera un betún genérico, uno de modificado con polímeros y un tipo de emulsión.

### 5.2.7. ECCO<sub>2</sub>

#### 5.2.7.1. Descripción general



Recientemente, a finales de mayo de 2019, se ha desarrollado una herramienta específica para estimar los impactos ambientales de las mezclas bituminosas, permitiendo evaluar mezclas producidas con distintos materiales y en condiciones de producción muy diversas.

Se trata de un modelo sencillo para facilitar el análisis de los efectos ambientales de las principales variables que intervienen en la fabricación de las mezclas bituminosas calientes, semicalientes y templadas (Ortiz, J., 2019). Forma parte de un proyecto en el que ha colaborado activamente Jorge Ortiz, autor principal de la Herramienta del Gobierno de Aragón (ver punto 5.2.4. *Herramienta de evaluación ambiental del Gobierno de Aragón*), junto con la empresa Benito Arnó e Hijos, y que ha sido galardonado con el premio a la *Mejor Comunicación Libre de la XIV Jornada ASEFMA*.

Se trata de un aplicativo libre y sin registro previo, disponible en la página web de Arnó ([arno.es/es/ecco2/](http://arno.es/es/ecco2/), 2019). Actualmente, es posible acceder a una primera versión, habilitada únicamente para el cálculo del *Indicador de Cambio Climático* (expresado en kg de CO<sub>2</sub> equivalente). Su idioma de trabajo es el español y dispone de una pequeña guía de uso.

El origen de los datos con los que trabaja es diverso. Por un lado, recurre a bases de datos reconocidas y de acceso público. Por otro lado, trabaja con datos propios obtenidos de la empresa y con modelos de cálculo. La obtención de todos ellos se define con detalle en el artículo *Impactos ambientales de las mezclas bituminosas según el modelo ECCO<sub>2</sub>* (Ortiz, J., 2019).

La unidad funcional con la que trabaja es una tonelada (1 tn) de mezcla bituminosa puesta en obra. Finalmente, las etapas del CV consideradas son: la extracción, transformación y transporte de las materias primas o secundarias, los productos energéticos, la fabricación, el transporte y, por último, la puesta en obra de las mezclas. Es decir, realiza un análisis del tipo “de la cuna a la tumba” (*cradle to gate*).

### 5.2.7.2. Modo de trabajo

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, ECCO<sub>2</sub> se basa en un aplicativo *web* bastante sencillo de utilizar. Al entrar en la aplicación, se aprecia la existencia de cuatro ventanas diferentes (Materias primas, Fabricación, Puesta en obra y Cálculos) en las que es necesaria la introducción de una serie de variables.

El número de variables, en su versión actual, asciende hasta un total de 92, de las cuáles el usuario puede establecer 75, mientras que las demás son variables dependientes de otras o determinadas por defecto. Entre ellas, es posible establecer distintos tipos de áridos y betunes, tasas de reciclado, temperaturas de fabricación de la mezcla, rendimientos de fabricación y puesta en obra, distancias de transporte, etc. (Ortiz, J., 2019).

En cada una de las cuatro ventanas, se encuentran una serie de celdas que contienen listas desplegables en las que deben introducirse los valores numéricos de las variables en cuestión. Por defecto, la herramienta muestra inicialmente los campos rellenos con valores introducidos por defecto, para facilitar el trabajo al usuario.

Si se analiza con detalle cada una de las ventanas, los pasos que deben seguirse son:

#### 1. Materias primas

Tal y como se muestra en la imagen (*Figura 60*), la introducción de las materias primas se divide en tres apartados diferentes, a la vez divididos en una serie de variables.

Estos apartados son:

- Dosificación en frío:
  - o Árido fino (Tipo 1 y 2): diferenciando entre árido triturado, no triturado, reciclado y siderúrgico.
  - o Árido grueso (Tipo 1 y 2): diferenciando entre árido triturado, no triturado, reciclado y siderúrgico.
  - o Mermas en acopios o transporte.
- Dosificación en caliente:
  - o Polvo mineral de aportación: diferenciando entre calizo, residual y cemento.
  - o Aditivo (Tipo 1 y 2): con la posibilidad de escoger entre un total de 11 tipos de aditivo diferentes.
  - o RAP: diferenciando entre clasificado, sin tratar o triturado.
  - o Betún en el RAP
  - o Betún residual en el ligante bituminoso
  - o Proporción del betún total en la mezcla
  - o Betún nuevo añadido a la mezcla: con la posibilidad de escoger entre un total de 15 tipos de betún diferentes.
- Transporte de las materias primas
  - o Motorización de los vehículos.

En las variables relativas a las *Dosificaciones en frío y caliente*, además de la naturaleza, es necesario introducir la proporción y distancia de transporte.

## Materias primas y su transporte



Materias primas
Fabricación
Puesta en obra
Cálculos

**Dosificación en frío**

	Naturaleza	Proporción (%)	Distancia
Árido fino 1	Árido triturado ▼	40 s/a	5 km
Árido fino 2	Árido no triturado ▼	10 s/a	15 km
Árido grueso 1	Árido triturado ▼	20 s/a	60 km
Árido grueso 2	Árido triturado ▼	20 s/a	60 km
Mermas en acopios o transporte		3 s/a	

**Dosificación en caliente**

	Naturaleza	Proporción (%)	Distancia
Polvo mineral de aportación	PM calizo ▼	2 s/a	110 km
Aditivo 1	NO ▼	0 s/m	110 km
Aditivo 2	NO ▼	0 s/betún	90 km
RAP	RAP clasificado ▼	10 s/m	15 km
Betún en el RAP		4 s/m	
Betún residual en el ligante bituminoso		100 s/m	
Proporción del betún total en la mezcla		5 s/m	
Betún nuevo añadido a la mezcla	PMB 45/80-65 ▼	4.6 s/m	160 km

**Transporte de las materias primas**

	Estándar del motor	Carga neta	Consumo (100km)
Motorización de los vehículos	Euro I ▼	25 t	30.1 l

Figura 60 Ventana de trabajo: Materias primas. Fuente: ECCO<sub>2</sub>.

## 2. Fabricación

En relación a la etapa de fabricación, los datos a introducir son los siguientes (Figura 61):

- Condiciones y tiempos de producción:
  - Altitud
  - Capacidad
  - Producción media diaria
- Fuentes de energía y equipos:
  - Quemador del secadero: diferenciando entre fuelóleo, gasóleo y gas natural.
  - Motores de la central: diferenciando entre grupo electrógeno o red eléctrica.
  - Calentamiento de ligantes: diferenciando entre caldera de fuelóleo, caldera de gasóleo, caldera de gas natural y red eléctrica.
  - Pala cargadora: diferenciando entre 9 modelos y 5 estándares del motor.
  - Grupo electrógeno
- Humedades y agua de proceso:
  - % de humedad de los áridos finos, gruesos y RAP.
  - Agua de proceso
  - Humedad residual
- Temperaturas:
  - Ambiente
  - Áridos

- RAP
- Ligante bituminoso
- Agua de proceso
- Gases
- Mezcla Bituminosa

## Fabricación en central



Materias primas
Fabricación
Puesta en obra
Cálculos

**Condiciones y tiempos de producción**

Altitud m.s.n.m	<input type="text" value=" &lt;500"/>	Horas de funcionamiento diario	<input type="text" value=" 6"/> h
Capacidad	<input type="text" value=" 220"/> t/h	Funcionamiento ininterrumpido	<input type="text" value=" 2"/> h
Producción media diaria	<input type="text" value=" 800"/> t	Actuación sistema calentamiento	<input type="text" value=" 4"/> h/d

**Fuentes de energía y equipos**

	<small>Fuente</small>		<small>Modelo CAT o similar</small>
Quemador del secadero	<input type="text" value=" Fuelóleo"/>	Pala cargadora	<input type="text" value=" CAT 950 M"/>
Motores de la central	<input type="text" value=" Grupo electrógeno"/>		
			<small>Estándar del motor</small>
Calentamiento de ligantes	<input type="text" value=" Caldera de fuelóleo"/>	Pala cargadora	<input type="text" value=" Stage II (Tier 2)"/>
Grupo electrógeno	<input type="text" value=" Gasóleo"/>	Grupo electrógeno	<input type="text" value=" Convencional"/>

**Humedades y agua de proceso**

Selección \*

Árido fino 1	<input type="radio"/>	<input type="text" value=" 2.5"/>	% s/a
Árido fino 2	<input type="radio"/>	<input type="text" value=" 2.5"/>	% s/a
Árido grueso 1	<input type="radio"/>	<input type="text" value=" 1"/>	% s/a
Árido grueso 2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value=" 1"/>	% s/a
RAP	<input type="radio"/>	<input type="text" value=" 5"/>	% s/a
Agua de proceso		<input type="text" value=" 0"/>	% s/a
Humedad residual		<input type="text" value=" 0"/>	% s/m

**Temperaturas**

Ambiente	<input type="text" value=" 20"/>	°C
Áridos	<input type="text" value=" 15"/>	°C
RAP	<input type="text" value=" 15"/>	°C
Ligante bituminoso	<input type="text" value=" 150"/>	°C
Agua de proceso	<input type="text" value=" 15"/>	°C
Gases	<input type="text" value=" 115"/>	°C
Mezcla bituminosa	<input type="text" value=" 165"/>	°C

\* Seleccionar la fracción introducida directamente en la mezcladora, en su caso, o bien "NO".

Figura 61 Ventana de trabajo: Fabricación. Fuente: ECCO<sub>2</sub>.

### 3. Puesta en obra

En cuanto a la etapa de transporte y puesta en obra, los datos a introducir son los siguientes (Figura 62):

- Condiciones de la puesta en obra:
  - Distancia de central a obra
  - Rendimiento diario
  - Mermas de puesta en obra
  - Espesor de cada
  - Densidad de la capa compactada
  - Introducción del tipo, frecuencia y uso diario de la maquinaria siguiente:
    - Silo de transferencia
    - Extendedora
    - Compactador tándem, Dynapac o similar
    - Compactador de neumáticos

- Fresadora, Wirtgen o similar
- Barredora, Bobcat o similar
- Motorización de vehículos y maquinaria.

## Transporte y puesta en obra



Materias primas
Fabricación
Puesta en obra
Cálculos

Condiciones de la puesta en obra

Distancia de central a obra	80	km	Espesor de capa	50	mm
Rendimiento diario	800	t/d	Densidad de la capa compactada	2.4	t/m <sup>3</sup>
Mermas de puesta en obra	2.5	s/m	Unidad Funcional	1	t

Condiciones de la puesta en obra

	Tipo	Potencia	Uso diario
Silo de transferencia	ROAD SB2500 ▼	233 kW	8 h
Extendedora 1, Vögele o similar	SUPER 1900 ▼	150 kW	
Extendedora 2, Vögele o similar	NO ▼	- kW	
Compactador tandem 1, Dynapac o similar	CC 4200 ▼	97 kW	
Compactador tandem 2, Dynapac o similar	NO ▼	- kW	
Compactador tandem 3, Dynapac o similar	NO ▼	- kW	
Compactador de neumáticos 1	24 - 30 t ▼	90 kW	
Compactador de neumáticos 2	NO ▼	- kW	
Compactador de neumáticos 3	21 - 24 t ▼	74 kW	
Fresadora, Wirtgen o similar	W100 Ri ▼	180 kW	
Barredora, Bobcat o similar	S 510 ▼	36.4 kW	4 h

Motorización de vehículos y maquinaria

Vehículos de transporte	Euro II ▼	Maquinaria	Stage II (Tier 2) ▼
-------------------------	-----------	------------	---------------------

Figura 62 Ventana de trabajo: Puesta en obra. Fuente: ECCO<sub>2</sub>.

## 4. Cálculos

En la última de las ventanas, previa a la visualización de los resultados, debe introducirse el nombre del proyecto, seleccionar las categorías de impacto con las que se desea trabajar y el modo de presentación de los resultados (Figura 63).



## Cálculo y presentación de resultados



**Identificación**

Denominación de la opción en cálculo

**Alcance del estudio**

Categoría de impacto	Unidad	Selección
Materias primas totales	kg	<input type="checkbox"/>
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq.	<input type="checkbox"/>
Demanda acumulada de energía	MJ	<input type="checkbox"/>
Indicador de cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq.	<input checked="" type="checkbox"/>
Acidificación	Mol H <sup>+</sup> eq.	<input type="checkbox"/>
Eutrofización	g PO <sub>4</sub> eq.	<input type="checkbox"/>
Formación de oxidantes	g etileno eq.	<input type="checkbox"/>
Recuperación de residuos	kg	<input type="checkbox"/>

**Presentación de resultados**

Histograma y variables (una categoría)

☒

Histograma ampliado (dos o más categorías)

☐

Gráfica radial (sólo para tres o más categorías)

☐

**Calcular y guardar**

Guardar configuración Alternativa 1 ▼

Resultados

Figura 63 Ventana de trabajo: Cálculos. Fuente: ECCO<sub>2</sub>.

### 5.2.7.3. Presentación de los resultados

La herramienta de ECCO<sub>2</sub> está pensada para obtener resultados en 8 categorías de impacto diferentes:

- Consumo de Materias Primas Totales [kg]
- Agotamiento de Recursos Abióticos [kg Sb eq]
- Demanda Acumulada de Energía [MJ]
- Indicador de Cambio Climático [kg CO<sub>2</sub> eq]
- Acidificación [Mol H<sup>+</sup> eq]
- Eutrofización [g PO<sub>4</sub> eq]
- Formación de Oxidantes Fotoquímicos [g etileno eq]
- Uso de Residuos [kg]

Los valores obtenidos, para la UF de 1 tonelada de mezcla, se presentan de un modo sencillo. Se utiliza el histograma en caso de representar una o dos categorías de impacto. Si se desea trabajar con tres o más, los datos finales se visualizan en forma de gráfico radial. Además, el programa permite la comparación entre cuatro alternativas diferentes (Figura 64).

## Resultados y resumen de variables utilizadas en los cálculos



Materias primas

Fabricación

Puesta en obra

Resultados

Imprimir

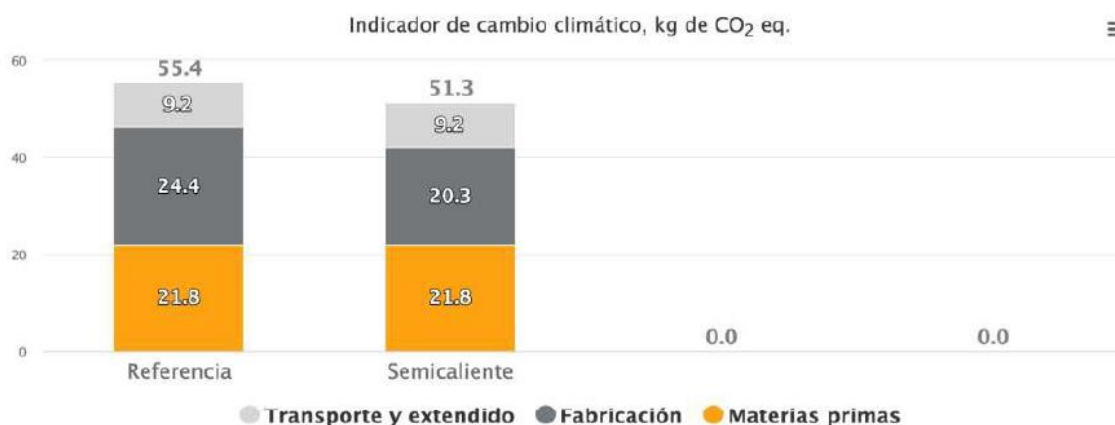


Figura 64 Ejemplo de presentación de los resultados en forma gráfica. Fuente: ECCO<sub>2</sub>.

Resulta importante comentar que los gráficos que trabajan con diferentes indicadores de categorías de impacto distintas, no realizan sumas incongruentes, puesto que se utilizan escalas arbitrarias para que todos los valores aparezcan incluidos en los rangos de representación previstos (Ortiz, J., 2019).

Adicionalmente a los resultados gráficos, se proporciona también una tabla con la recopilación de todas las variables utilizadas en cada cálculo, para su posterior análisis y la mejor comparativa de alternativas (Figura 65).

Materias primas y su transporte			Fabricación en central			Transporte y puesta en obra		
	Referencia	Semicaliente		Referencia	Semicaliente		Referencia	Semicaliente
1 Árido fino 1, proporción (%)	40	40	1 Altitud snm (m)	<500	<500	1 Distancia central obra	80	60
2 Árido fino 2, proporción (%)	10	10	2 Capacidad (t/h)	220	220	2 Rendimiento diario	800	800
3 Árido grueso 1, proporción (%)	20	20	3 Producción diaria (t)	800	800	3 Mermas de puesta en obra (%)	2.5	2.5
4 Árido grueso 2, proporción (%)	20	20	4 Funcionamiento diario (h)	6	6	4 Espesor de capa, mm	50	50
5 Mermas en acopio o transporte, (%)	3	3	5 Actuación sistema calentamiento (h)	4	4	5 Densidad de la capa compactada (t/m <sup>3</sup> )	2.4	2.4
6 Árido fino 1, naturaleza	triturado	triturado	6 Combustible secadero	Fuelóleo	Fuelóleo	6 Unidad funcional	1	1
7 Árido fino 2, naturaleza	no triturado	no triturado	7 Motores de la central, fuente	Grupo electrógeno	Grupo electrógeno	7 Silo de transferencia, tipo	ROAD SB2500	ROAD SB2500
8 Árido grueso 1, naturaleza	triturado	triturado	8 Calentamiento de ligantes, sistema	Caldera de fuelóleo	Caldera de fuelóleo	8 Extensora 1, tipo	SUPER 1900	SUPER 1900
9 Árido grueso 2, naturaleza	triturado	triturado	9 Grupo electrógeno, combustible	Gasóleo	Gasóleo	9 Extensora 2, tipo	NO	NO
10 Árido fino 1, distancia (km)	5	5	10 Pala cargadora, modelo	CAT 950 M	CAT 950 M	10 Compactador tandem 1, tipo	CC 4200	CC 4200
11 Árido fino 2, distancia (km)	15	15	11 Pala crédito	Stage II (Tier 2)	Stage II (Tier 2)	11 Compactador tandem 2, tipo	NO	NO
12 Árido grueso 1, distancia (km)	60	60	12 Grupo electrógeno, motor	Convencional	Convencional	12 Compactador tandem 3, tipo	NO	NO
13 Árido grueso 2, distancia (km)	60	60	13 Árido fino 1, humedad (%)	2.5	2.5	13 Compactador de neumáticos 1, tipo	24 - 30 t	24 - 30 t
14 Polvo mineral, proporción (%)	2	2	14 Árido fino 2, humedad (%)	2.5	2.5	14 Compactador de neumáticos 2, tipo	NO	NO
15 Aditivo 1, proporción (%)	0	0	15 Árido grueso 1, humedad (%)	1	1	15 Fresadora, tipo	W100 RI	W100 RI
16 Aditivo 2, proporción (%)	0	0	16 Árido grueso 2, humedad (%)	1	1	16 Barredora, tipo	S 510	S 510
17 RAP, proporción (%)	10	10	17 RAP, humedad (%)	5	5	17 Equipo de extendido (h)	8	8
18 Betón contenido RAP (%)	4	4	18 Agua de proceso (%)	0	0	18 Fresadora, tiempo (h)	2	2
19 Betón residual ligante bituminoso (%)	100	100	19 Humedad residual (%)	0	0	19 Barredora, tiempo (h)	4	4
20 Betón total en la mezcla (%)	4.6	4.6	20 Fracción a la mezcladora	Ninguna	Ninguna	20 Vehículos, motor	Euro II	Euro II
21 Betón nuevo en la mezcla (%)	5	5	21 Temperatura ambiente (°C)	20	20	21 Maquinara, motor	Stage II (Tier 2)	Stage II (Tier 2)
22 Polvo mineral, naturaleza	calizo	calizo	22 Temperatura de los áridos	15	15			
23 Aditivo 1, naturaleza	NO	NO	23 Temperatura RAP	15	15			
24 Aditivo 2, naturaleza	NO	NO	24 Temperatura ligante bituminoso	150	150			
25 RAP, naturaleza	RAP clasificado RAP clasificado	RAP clasificado RAP clasificado	25 Temperatura agua de proceso	15	15			
26 Betón nuevo, naturaleza	PMB 45/80-65	PMB 45/80-65	26 Temperatura de gases	115	115			
27 Polvo mineral, distancia (km)	110	110	27 Temperatura de la mezcla bituminosa	165	130			
28 Aditivo 1, distancia (km)	110	110						
29 Aditivo 2, distancia (km)	90	90						
30 RAP, distancia (km)	15	15						
31 Betón nuevo, distancia (km)	160	160						
32 Vehículos, carga neta (t)	24	24						
33 Vehículos, estándar motor	Euro I	Euro I						
34 Vehículos, consumo (l/100 km)	30.1	30.1						

Figura 65 Ejemplo de recopilación de datos utilizados en los cálculos. Fuente: ECCO<sub>2</sub>.

A pesar de lo comentado en este punto, debido a que se trata de una herramienta estrenada hace solamente unos días, hasta ahora sólo se permite la posibilidad de trabajar con la categoría de *Indicador de Cambio Climático*. Se espera que en posibles actualizaciones se incluyan el resto de categorías.

#### 5.2.7.4. Ventajas y limitaciones

Las ventajas y limitaciones que se han encontrado son:

##### Ventajas

- Herramienta específica.
- Uso libre y sin registro.
- Fácil manejo.
- Idioma español.
- Gran cantidad de variables (un total de 92).
- Datos de calidad, bases de datos conocidas y datos propios.
- Etapa de procesamiento de los materiales, puesta en obra y transporte.
- Resultados numéricos y gráficos.
- 8 categorías de impacto (por el momento, sólo 1 disponible).
- Permite el cálculo de 4 alternativas.
- Dispone de guía de uso.

##### Limitaciones

- Únicamente para mezclas bituminosas (calientes, semicalientes y templadas).
- No permite el CCVF.
- No considera la etapa de mantenimiento/rehabilitación.
- No considera la etapa de uso.
- No considera la etapa de fin de vida.
- En la actualidad, una única categoría de impacto (Indicador del Cambio Climático).
- No considera horizontes temporales.

### 5.3. Selección final para el ejemplo práctico

A lo largo de este capítulo se han analizado 6 herramientas de ACV diferentes. Entre ellas, *GaBi* es la única de tipo generalista, mientras que el resto (la hoja de cálculo del IECA, la herramienta del Gobierno de Aragón, *HueCO<sub>2</sub>*, *Eurobitume* y *ECCO<sub>2</sub>*) son específicas para ACVF.

Como ya se ha comentado anteriormente, uno de los motivos de esta selección ha sido el hecho de que todas eran de acceso gratuito, excepto *GaBi*. Sin embargo, ésta dispone de una licencia de estudiante de la que se ha podido hacer uso. Por este motivo, la existencia de licencia no ha sido un condicionante a la hora de la selección final.

Otro de los aspectos más importantes es el número de fases que se consideran en el análisis. En la tabla que sigue (*Tabla 9*), se muestran todas las herramientas y se marcan las etapas que se incluyen en cada una de ellas.

Tabla 9 Etapas del CV analizadas en cada herramienta. Fuente: Elaboración propia.

		Prod. Materiales	Construcción	Mant. y Rehab.	Explotación/ Uso	Fin de vida
Metodología	<i>GaBi</i>	X	X	X	X	X
	IECA	X	X	X		
	Gobierno de Aragón	X	X	X		
	<i>HueCO<sub>2</sub></i>	X	X			
	<i>Eurobitume</i>	X	X			
	<i>ECCO<sub>2</sub></i>	X	X			

Como se puede observar, el único *software* que considera el ciclo de vida completo es *GaBi*, mientras que, tanto la herramienta creada por el IECA, como la del Gobierno de Aragón, consideran las etapas de producción y procesamiento de los materiales, la construcción del firme y el mantenimiento. Si bien es cierto, para el análisis ambiental de la fase de mantenimiento y rehabilitación ambiental mediante la herramienta del Gobierno de Aragón, es necesario trabajar con una hoja de *Excel* diferente. Por el contrario, *HueCO<sub>2</sub>*, *Eurobitume* y *ECCO<sub>2</sub>* únicamente consideran un análisis de la cuna a la puerta (*cradle to gate*).

El hecho que *HueCO<sub>2</sub>* y *Eurobitume* solo consideren la obtención de los materiales y la construcción del firme, se debe a que son más bien BBDDs que herramientas propiamente de ACVF. En este caso, serían más útiles como información para obtener datos de calidad que para un análisis del ciclo de vida. Por esta razón, no se ha considerado su uso para el caso práctico del presente estudio.

Respecto a *ECCO<sub>2</sub>*, a pesar de contemplar las mismas etapas que las dos herramientas anteriores, es un programa muy detallado para la realización de ACV únicamente de mezclas bituminosas. Por lo tanto, si se desea sólo conocer con detalle los impactos asociados a los procesos de fabricación y puesta en obra de las mezclas, se trata de la herramienta más detallada. No obstante, al ser tan reciente, únicamente se encuentra disponible el cálculo de la categoría relativa al cambio climático.

Si se valora exclusivamente el número de etapas consideradas y el modo de presentación de los resultados, *GaBi* es el único programa que permite realizar un análisis del CV completo y trabajar con la mayoría, por no decir la totalidad, de indicadores y categorías de impacto utilizadas. No obstante, para poder sacar el máximo partido del programa, se requieren unos conocimientos avanzados de uso. La creación de un sistema, con la totalidad de las etapas y considerando la mayoría de las variables, presenta grandes dificultades. Por ello, para este trabajo se ha preferido trabajar con otros programas, en lugar de crear un sistema muy sencillo con *GaBi*.

Además, las herramientas generalistas trabajan con datos internacionales, principalmente de ámbito europeo, por lo que están menos particularizados para el sector de las carreteras españolas. En este caso, resulta de mayor interés una herramienta adaptada a las necesidades del sector de la construcción español, que trabaje con datos de obras y empresas del país.

En este punto, nos encontramos únicamente con las dos herramientas restantes, la del IECA y la del Gobierno de Aragón. De la primera se conoce el origen de sus datos ambientales, puesto que provienen de la Tesis de Moral (*Moral, A., 2016*), excepto los de firmes rígidos, facilitados por el IECA. De la segunda, se desconoce los datos con los que trabaja. A pesar de ello, como ya se ha comentado, su autor ya trabajó en el proyecto español AVACo (*ver punto 4.2.1. AVACo y LCA-Abacus*) y el hecho de ser utilizada por la Administración Pública de una Comunidad Autónoma, lleva a pensar que trabaja con datos de ámbito nacional.

La herramienta del Gobierno de Aragón, por un lado, es mucho más completa en cuanto a variables de entrada. Permite la introducción de una gran cantidad de datos y dentro de cada etapa del ACV, se pueden distinguir las subetapas o subprocesos. Por otro lado, es imposible conocer los factores de emisión asociados a cada uno de los procesos. A modo resumen, es como una caja negra, únicamente se introducen variables de entrada y se obtienen los resultados finales.

La herramienta del IECA es una hoja de *Excel* abierta, dónde pueden verse y modificarse todos y cada uno de los datos. Sin embargo, éstos no se dividen en subetapas y las variables de entrada con las que poder jugar son mucho más reducidas. Otro aspecto a considerar, a pesar de no ser objeto de este estudio, es la posibilidad de realizar también análisis de costes (CCVF).

A nivel de categorías de impacto consideradas, ambos programas consideran las principales emisiones o afecciones al medio. La primera presenta una totalidad de 5 categorías de impacto, mientras que en la segunda, los resultados se muestran para 8 indicadores diferentes. En ambos casos se pueden realizar ACVF para los principales tipos de secciones de firmes, tanto flexibles, semirígidos o rígidos. Pero, únicamente la herramienta del Gobierno de Aragón permite la comparación en el mismo estudio de 4 alternativas diferentes.

Por todos y cada uno de los motivos mencionados en este apartado, se ha considerado que la herramienta que mejor se ajusta a las necesidades del trabajo es la del Gobierno de Aragón. A pesar de ello, el desconocimiento de la base de datos con la que trabaja crea una gran incertidumbre. Por consiguiente, se ha decidido finalmente realizar un ejemplo práctico utilizando este software, y paralelamente, elaborar otro ejemplo para un firme de las mismas características con la hoja del IECA. De este modo, será posible ver si los resultados obtenidos siguen la misma tendencia, o si por el contrario, se llega a conclusiones muy dispares.

## Capítulo 6

# CASO PRÁCTICO 1 – HERRAMIENTA GOBIERNO DE ARAGÓN

En el presente capítulo se realiza, a modo de ejemplo práctico, un Análisis del Ciclo de Vida completo mediante el uso de la primera de las herramientas seleccionadas, la Herramienta del Gobierno de Aragón. En los próximos apartados, se detallan todos los pasos seguidos en la ejecución de cada una de las etapas del ACV en cuestión.

### 6.1. Definición del objetivo, alcance y límites del sistema

El objetivo del caso práctico que se lleva a cabo en este capítulo es, como en cualquier ACVF, el análisis ambiental de una o varias secciones de firmes. Con ello, se consigue conocer las etapas que, dentro del ciclo de vida, implican una mayor afectación al entorno. Además, se permite la comparación entre las diferentes secciones analizadas.

El alcance y los límites del sistema dependen de las etapas consideradas. En este caso, al estar utilizando la Herramienta del Gobierno de Aragón, se trabaja con las etapas de producción de los materiales y construcción o puesta en obra. Posteriormente, mediante la ayuda de un documento externo, se incluyen también los cálculos ambientales relativos a las operaciones de mantenimiento y rehabilitación. Por lo tanto, se excluyen del CV, tanto la etapa de uso como la de fin de vida. Todo esto, ha sido ya explicado con detalle en el *punto 5.2.4. Herramienta de evaluación ambiental del Gobierno de Aragón*.

La totalidad de los cálculos debe referenciarse a la unidad funcional (UF) que, en la presente herramienta, es 1 m<sup>2</sup> de sección, incluyendo la explanada y el firme. Para este ejemplo, se escogen diferentes tipos de sección, con el objetivo de poder hacer una comparación entre ellas. Concretamente, lo que se pretende es poder comparar entre los impactos que se generan al fabricar una tonelada de mezcla bituminosa y, alternativamente, una tonelada de hormigón. Además, se quiere también contrastar las diferencias entre una sección de tipo flexible y otra de rígida y, por último, dentro de las de tipo flexible, entre las formadas por MB sobre material granular y MB sobre suelocemento.

Con el fin de poder realizar hacer una comparación lo más equitativa posible, la elección de las secciones se ha hecho de modo que todas ellas se encontraran dentro de la misma categoría de tráfico y sobre el mismo tipo de suelo y de explanada, únicamente variando el tipo de firme. Se ha escogido trabajar con una categoría de tráfico T1, con una intensidad diaria de vehículos pesados entre 800 y 2.000 (*IMD<sub>p</sub>* – vehículos pesados/día), un suelo de tipo tolerable y una explanada de tipo E3, con un módulo de compresibilidad al segundo ciclo de carga (*E<sub>v2</sub>*) superior

a 300 MPa. En cuanto a los tipos de firme analizados, como ya se ha dicho, se han escogido los siguientes tres:

- Mezclas bituminosas sobre capa granular.
- Mezclas bituminosas sobre suelo cemento.
- Pavimento de hormigón.

Dichas secciones de firmes se dividen en capas de diferentes espesores y materiales que se detallaran en la siguiente etapa de este ACV, la realización del inventario.

## 6.2. Análisis de Inventario del Ciclo de Vida

En la segunda etapa del Análisis del Ciclo de Vida, es necesario realizar un inventariado con todos los datos de entrada y salida que afectan al sistema, para poder cumplir con los objetivos definidos en el punto anterior. Al estar trabajando con una herramienta específica para el ACVF, únicamente se deben proporcionar los datos de entrada con los que ésta trabaje. Los datos de salida, es decir, los impactos asociados a cada uno de los procesos, ya han sido previamente introducidos en el *software*.

A lo largo de este punto, se detallan todos los *inputs* asignados a los tres tipos de secciones. Sin embargo, es importante conocer de antemano las hipótesis generales consideradas durante el proceso:

- Se intenta, dentro de las posibilidades, que los valores de las variables sean los mismos que en la tesis de Alberto Moral (*Moral, A., 2016*). El principal motivo es porque el inventario de los datos de la herramienta que se utiliza en el segundo caso práctico (*Capítulo 7. Caso práctico 2 – Herramienta IECA*) proviene de dicho trabajo. De este modo, a pesar de no poder realizar una comparación directa de los resultados entre casos, se intenta que los datos de entrada sean lo más parecidos posible. Este procedimiento únicamente es aplicable a las secciones con material bituminoso. Con la sección rígida, los datos se asignan siguiendo las especificaciones de la norma.
- Las distancias de transporte de los materiales hasta la planta de fabricación y de la planta a la obra, se consideran iguales para los tres tipos de sección. De este modo, la etapa de transporte no es un factor determinante a la hora de comparar los impactos entre las secciones flexibles y rígidas.
- En la fabricación de cualquiera de los materiales no se considera ningún porcentaje de material reciclado, como podría ser el procedente del fresado de MB. Este ACVF es un ejemplo de estudio, no obstante, se es consciente de que el uso de materiales reciclados podría influir en los resultados finales de los impactos.

A continuación, siguiendo los pasos establecidos en la herramienta, se detalla el inventario necesario para la realización de los ACVs de las tres secciones, dividiéndose en las diferentes capas. Dentro de éstas, los datos de entrada se dividen en los diferentes procesos unitarios del ciclo de vida.

## 6.2.1. Fase producción de los materiales y construcción

### 6.2.1.1. Tipo de suelo y categoría de tráfico de proyecto

La categoría de tráfico pesado y el tipo de suelo considerados son los descritos en la primera etapa del ACVF, es decir, T1 y suelo tolerable.

**1. TIPO DE SUELO Y CATEGORÍA DE TRÁFICO DE PROYECTO**

(SELECCIONAR TIPO DE SUELO Y CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO)

TIPO DE SUELO

SUELO TOLERABLE

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO

T1

Figura 66 Tipo de suelo y categoría de tráfico. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

### 6.2.1.2. Materiales de la explanada

Con los datos introducidos en el punto anterior, se procede a realizar el inventario de los materiales que formaran parte de la explanada, a partir de las combinaciones que proporciona el programa. En el presente caso, para un tipo de suelo tolerable y una categoría de explanada E3, se deben introducir los valores de un suelo seleccionado S4, un suelo estabilizado S-EST 2 y S-EST3 y el riego de curado que se aplicará entre capas (Figura 67).

SECCIONES DE EXPLANADA OBJETO DE COMPARACIÓN					
RED AUTONÓMICA ARAGONESA		SUELOS TOLERABLES			
		Alternativa 1 A1	Alternativa 2 A2	Alternativa 3 A3	Alternativa 4 A4
CATEGORÍA DE LA EXPLANADA	EX 1 (BAJA)	<div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 40px; background-color: #f08080; margin: 0 auto;"></div> 30 cm S0 EX1 S3	<div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 40px; background-color: #f08080; margin: 0 auto;"></div> 25 cm S0 EX1 S4	<div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 40px; background-color: #90ee90; margin: 0 auto;"></div> 25 cm S0 EX1 S-EST1	<div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 40px; background-color: #8b4513; margin: 0 auto;"></div> 20 cm S0 EX1 S-EST2
	EX 2 (MEDIA)	<div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 60px; background-color: #f08080; margin: 0 auto;"></div> 60 cm S0 EX2 S3	<div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 60px; background-color: #f08080; margin: 0 auto;"></div> 50 cm S0 EX2 S4	<div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 60px; background-color: #8b4513; margin: 0 auto;"></div> 30 cm S0 EX2 S-EST3	<div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 60px; background-color: #8b4513; margin: 0 auto;"></div> 18 cm S-EST 2 S-EST 2 S0 EX2 S-EST2
	EX 3 (ALTA)	<div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 60px; background-color: #8b4513; margin: 0 auto;"></div> 30 cm <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 40px; background-color: #f08080; margin: 0 auto;"></div> 25 cm S0 EX3 S4 S-EST3	<div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 60px; background-color: #8b4513; margin: 0 auto;"></div> 25 cm <div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 40px; background-color: #8b4513; margin: 0 auto;"></div> 20 cm S0 EX3 S-EST2-3		

Figura 67 Posibles secciones de explanada. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.



### Suelo seleccionado S4

Los datos para una unidad funcional de 1 m<sup>3</sup> de capa construida son (Figura 68):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO:		S13
<b>VARIABLES</b>		
<b>PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAM. RCD, OBTENCIÓN Y CARGA DE SS</b>		
R <sub>1</sub>	800.00	m <sup>3</sup> /d Rendimiento de fabricación (propuesta por defecto, R <sub>1</sub> =800 m <sup>3</sup> /día)
P <sub>1</sub>	-	% Proporción de RCD en peso
d <sub>1</sub>	-	km Distancia desde la zona de obtención de RCD hasta la instalación
D <sub>c</sub>	2.28	t/m <sup>3</sup> Densidad de la capa construida (por defecto, D <sub>c</sub> =2,28 t/m <sup>3</sup> )
<b>PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): TRANSPORTE A OBRA</b>		
d <sub>2</sub>	35.00	km Distancia desde la instalación a la obra
<b>PROCESO UNITARIO 3 (PU 3): PUESTA EN OBRA</b>		
R <sub>3</sub>	800.00	m <sup>3</sup> /d Rendimiento de puesta en obra (p.p.d., R <sub>3</sub> =800 m <sup>3</sup> /día)

Figura 68 Inventario suelo seleccionado S4. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

Como ya se ha dicho, no se considera el uso de materiales reciclados, por lo que no se introduce ningún valor en la proporción de RCD. Para los rendimientos de fabricación y puesta en obra, se toman los valores establecidos por defecto y, por último, se considera una distancia hasta la obra de 35 km, el valor más parecido posible a los 37,5 km considerados en el estudio de Moral (Moral, A., 2016).

### Suelo estabilizado S-EST 2

Los datos para una unidad funcional de 1 m<sup>3</sup> de capa construida son (Figura 69):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO:		S13
<b>VARIABLES</b>		
<b>PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTOS Y TRASNPORTE DE MP A OBRA</b>		
P <sub>1</sub>	-	% Proporción de suelo de aportación
P <sub>2</sub>	3.00	% Proporción conglomerante (p.p.d., p <sub>2</sub> =3,0% cal/cemento ó p <sub>2</sub> =4% cal hidratada)
d <sub>1</sub>	-	km Distancia zona de obtención de suelo de aportación hasta la obra
d <sub>2</sub>	30.00	km Distancia desde la zona de obtención del conglomerante hasta la obra
D <sub>c</sub>	2.00	t/m <sup>3</sup> Densidad de la capa construida (p.p. 2.00 t/m <sup>3</sup> )
<b>PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): EJECUCIÓN EN OBRA Y TERMINACIÓN</b>		
R <sub>2</sub>	1,000.00	m <sup>3</sup> /d Rendimiento ejecución de obra (propuesta por defecto, R <sub>2</sub> =1.000 m <sup>3</sup> /día)
<b>DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CONGLOMERANTE</b>		
T	Cemento	Conglomerante hidráulico utilizado

Figura 69 Inventario suelo estabilizado S-EST 2. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

El tipo de conglomerante seleccionado es el cemento y su porcentaje, el mínimo establecido por la Norma 6.1-IC para los suelos estabilizados tipo S-EST 2 y S-EST 3, es decir, el 3%.

### Suelo estabilizado S-EST 3

Los datos para una unidad funcional de 1 m<sup>3</sup> de capa construida son (Figura 70):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO:		S13
<b>VARIABLES</b>		
<b>PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTOS Y TRANSPORTES DE MP A OBRA</b>		
p <sub>1</sub>	-	% Proporción de suelo de aportación
p <sub>2</sub>	3.00	% Proporción conglomerante (p.p.d., p <sub>2</sub> =3,0% cal/cemento ó p <sub>2</sub> =4% cal hidratada)
d <sub>1</sub>		km Distancia zona de obtención de suelo de aportación hasta la obra
d <sub>2</sub>	30.00	km Distancia desde la zona de obtención del conglomerante hasta la obra
D <sub>c</sub>	2.10	t/m <sup>3</sup> Densidad de la capa construida (p.p 2.10 t/m <sup>3</sup> )
<b>PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): EJECUCIÓN EN OBRA Y TERMINACIÓN</b>		
R <sub>2</sub>	1,000.00	m <sup>3</sup> /d Rendimiento ejecución de obra (propuesta por defecto, R <sub>2</sub> =1.000 m <sup>3</sup> /día)
<b>DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CONGLOMERANTE</b>		
T	Cemento	Conglomerante hidráulico utilizado

Figura 70 Inventario suelo estabilizado S-EST 3. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

### Riego de curado

Los datos para una unidad funcional de 1 m<sup>2</sup> de capa construida son (Figura 71):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO:		S13
<b>VARIABLES</b>		
<b>PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTO Y APLICACIÓN DE EMULSIÓN</b>		
T <sub>E</sub>	C60B2 CUR	Tipo de emulsión 60.00 % ligante residual
δ <sub>e</sub>	0.30	kg/m <sup>2</sup> Dotación superficial de emulsión (ligante residual)
R <sub>1</sub>	8,000.00	m <sup>2</sup> /d Rendimiento de aplicación de la emulsión (p.p.d, R <sub>1</sub> =8.000 m <sup>2</sup> /día)
<b>PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): APROVISIONAMIENTO Y EXTENSIÓN DE ÁRIDO</b>		
δ <sub>a</sub>	4.00	l/m <sup>2</sup> Dotación superficial de árido de cubrición
D <sub>c</sub>	2.00	t/m <sup>3</sup> Densidad del árido de cubrición compactado (p.p.d., D <sub>c</sub> =2,0 t/m <sup>3</sup> )
R <sub>2</sub>	8,000.00	m <sup>2</sup> /d Rendimiento de extensión de árido (prop. por defecto, R <sub>2</sub> =8.000 m <sup>2</sup> /día)

Figura 71 Inventario riego de curado. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

El tipo de riego de curado es C60B2 y la dotación de ligante considerada es la misma que en la tesis de Moral (Moral, A., 2016), 0.30 kg/m<sup>2</sup>, que a la vez coincide con el mínimo permitido por la norma. En cuanto a la dotación de árido de cubrición, se considera un valor de 4 l/m<sup>2</sup>, sin superar el máximo establecido de 6 l/m<sup>2</sup>.

#### 6.2.1.3. Materiales del firme

En el caso de las secciones con capas bituminosas, los tipos de mezclas de las capas (base, intermedia y rodadura) se consideran idénticos a los de la tesis (Moral, A., 2016) (Figura 72).

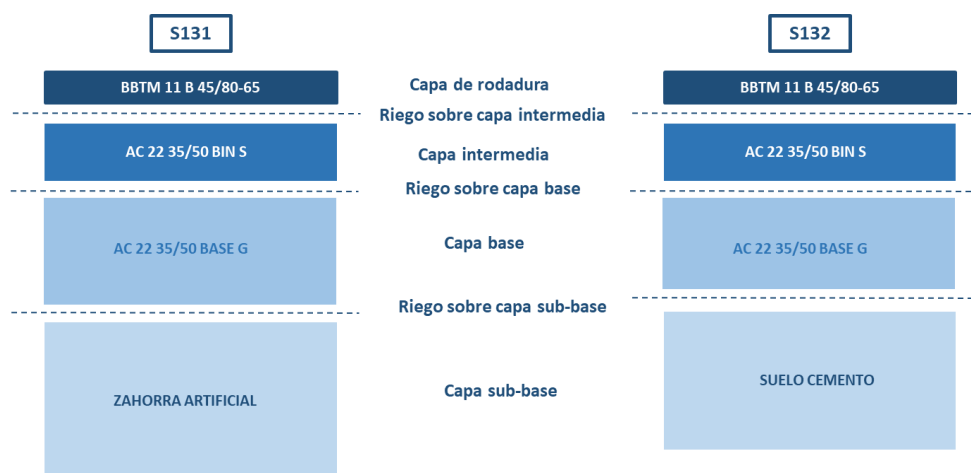


Figura 12 Esquema de las secciones S131 y S132. Fuente: Moral, A., 2016.

En el caso de la sección de tipo rígido (Figura 73) se han seguido las especificaciones de la norma. Al considerar una categoría de tráfico pesado del tipo T1, el Hormigón de Firme (HF) utilizado será de tipo HF-4,5 y el pavimento será de Hormigón magro vibrado (HM).



Figura 73 Esquema de la sección S134. Fuente: Elaboración propia.

En las páginas que siguen, se adjunta el inventario de todos los materiales del firme objeto de estudio.

### Capa de rodadura

Los datos para una unidad funcional de 1 tonelada de capa construida son (Figura 74):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO/SELECCIONADA:		S131
<b>VARIABLES</b>		
$T_M$	BBTM 11B	PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTO Y TRANSPORTE DE MP
$T_B$	PMB 45/80-65	Tipo de mezcla bituminosa
$p_1$	93.20 %	Tipo de betún
$p_2$	2.00 %	Proporción de áridos de machaqueo
$p_3$	-	Proporción de polvo mineral calizo
$p_4$	4.80 %	Proporción de materiales procedentes de fresado de MBC ( $p_3 \leq 15\%$ )
$d_1$	30.00 km	Proporción de betún
$d_2$	30.00 km	Distancia de la zona de obtención ár. machaqueo a central de fabricación
$d_3$	30.00 km	Distancia de obtención polvo mineral calizo a la central de fabricación
$d_4$	440.00 km	Distancia de obtención fresado de MBC hasta la central de fabricación
		Distancia de obtención del betún hasta la central de fabricación
<b>PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): FABRICACIÓN EN CENTRAL</b>		
$R_2$	800 t/día	Producción media de la central (p.p.d., $R_2=800$ t/día)
<b>PROCESO UNITARIO 3 (PU 3): TRANSPORTE A OBRA</b>		
$d_0$	35.00 km	Distancia desde la central a la obra
<b>PROCESO UNITARIO 4 (PU 4): PUESTA EN OBRA</b>		
$R_4$	800 t/día	Rendimiento de puesta en obra (p.p.d., $R_4=800$ t/día)

Figura 74 Inventario capa de rodadura. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

Al introducir el tipo de mezcla y betún, el programa proporciona automáticamente las proporciones de los materiales [%]. Al igual que para los materiales de la explanada, se considera una distancia de 30 km entre las canteras y la planta de fabricación. En el caso del betún, la distancia es de 440 km, también la misma que la considerada por Moral (*Moral, A., 2016*), de los cuáles 360 km son la distancia recorrida en barco y los 80 restantes por carretera. Finalmente, la distancia entre la planta de fabricación y la obra es de 35 km. Para los valores de rendimiento de producción en la central y puesta en obra se consideran los asignados por defecto, es decir, 800 t/día.

### Capa intermedia

Los datos para una unidad funcional de 1 tonelada de capa construida son (*Figura 75*):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO/SELECCIONADA:		S131
<b>VARIABLES</b>		
$T_M$	AC 22 BIN S	PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTO Y TRANSPORTE DE MP
$T_B$	35/50	Tipo de mezcla bituminosa
$p_1$	95.50 %	Tipo de betún
$p_2$	-	Proporción de áridos de machaqueo
$p_3$		Proporción de polvo mineral calizo
$p_4$	4.50 %	Proporción de materiales procedentes de fresado de MBC ( $p_3 \leq 15\%$ )
$d_1$	30.00 km	Proporción de betún
$d_2$	30.00 km	Distancia de la zona de obtención ár. machaqueo a central de fabricación
$d_3$		Distancia de obtención polvo mineral calizo a la central de fabricación
$d_4$	440.00 km	Distancia de obtención fresado de MBC hasta la central de fabricación
		Distancia de obtención del betún hasta la central de fabricación
$R_2$	800 t/día	PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): FABRICACIÓN EN CENTRAL
		Producción media de la central (p.p.d., $R_2=800$ t/día)
$d_0$	35.00 km	PROCESO UNITARIO 3 (PU 3): TRANSPORTE A OBRA
		Distancia desde la central a la obra
$R_4$	800 t/día	PROCESO UNITARIO 4 (PU 4): PUESTA EN OBRA
		Rendimiento de puesta en obra (p.p.d., $R_4=800$ t/día)

Figura 75 Inventario capa intermedia. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

### Capa base

Los datos para una unidad funcional de 1 tonelada de capa construida son (*Figura 76*):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO/SELECCIONADA:		S131
<b>VARIABLES</b>		
$T_M$	AC 22 BASE G	PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTO Y TRANSPORTE DE MP
$T_B$	35/50	Tipo de mezcla bituminosa
$p_1$	95.80 %	Tipo de betún
$p_2$	-	Proporción de áridos de machaqueo
$p_3$		Proporción de polvo mineral calizo
$p_4$	4.20 %	Proporción de materiales procedentes de fresado de MBC ( $p_3 \leq 15\%$ )
$d_1$	30.00 km	Proporción de betún
$d_2$	30.00 km	Distancia de la zona de obtención ár. machaqueo a central de fabricación
$d_3$		Distancia de obtención polvo mineral calizo a la central de fabricación
$d_4$	440.00 km	Distancia de obtención fresado de MBC hasta la central de fabricación
		Distancia de obtención del betún hasta la central de fabricación
$R_2$	800 t/día	PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): FABRICACIÓN EN CENTRAL
		Producción media de la central (p.p.d., $R_2=800$ t/día)
$d_0$	35.00 km	PROCESO UNITARIO 3 (PU 3): TRANSPORTE A OBRA
		Distancia desde la central a la obra
$R_4$	800 t/día	PROCESO UNITARIO 4 (PU 4): PUESTA EN OBRA
		Rendimiento de puesta en obra (p.p.d., $R_4=800$ t/día)

Figura 76 Inventario capa base. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

Riego de adherencia

Los datos para una unidad funcional de 1 m<sup>2</sup> de capa construida son (Figura 77):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO:		S131
VARIABLES		
PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTO Y APLICACIÓN DE EMULSIÓN		
T <sub>E</sub>	C60B3 ADH	Tipo de emulsión 60.00 % ligante residual
δ <sub>e</sub>	0.20	kg/m <sup>2</sup> Dotación superficial de emulsión (ligante residual)
R <sub>1</sub>	8,000.00	m <sup>2</sup> /d Rendimiento de aplicación de la emulsión (p.p.d, R <sub>1</sub> =8.000 m <sup>2</sup> /día)

Figura 77 Inventario riego de adherencia. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

Para la dotación del betún también se utiliza el mismo valor que en la tesis, esto es, 0,2 kg/m<sup>2</sup>.

Riego de imprimación

Los datos para una unidad funcional de 1 m<sup>2</sup> de capa construida son (Figura 78):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO:		S131
VARIABLES		
PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTO Y APLICACIÓN DE EMULSIÓN		
T <sub>E</sub>	C60BF4 IMP	Tipo de emulsión 60.00 % ligante residual
δ <sub>e</sub>	0.50	kg/m <sup>2</sup> Dotación superficial de emulsión (ligante residual)
R <sub>1</sub>	8,000.00	m <sup>2</sup> /d Rendimiento de aplicación de la emulsión (p.p.d, R <sub>1</sub> =8.000 m <sup>2</sup> /día)
PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): APROVISIONAMIENTO Y EXTENSIÓN DE ÁRIDO		
δ <sub>a</sub>	4.00	l/m <sup>2</sup> Dotación superficial de árido de cubrición
D <sub>c</sub>	2.00	t/m <sup>3</sup> Densidad del árido de cubrición compactado (p.p.d., D <sub>c</sub> =2,0 t/m <sup>3</sup> )
R <sub>2</sub>	8,000.00	m <sup>2</sup> /d Rendimiento de extensión de árido (prop. por defecto, R <sub>2</sub> =8.000 m <sup>2</sup> /día)

Figura 78 Inventario riego de imprimación. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

La dotación del betún, en el caso de riego de imprimación, se considera 0,5 kg/m<sup>2</sup> y una dotación de árido de cubrición de 4 l/m<sup>2</sup>.

Zahorra artificial

Los datos para una unidad funcional de 1 m<sup>3</sup> de capa construida son (Figura 79):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO:		S131
VARIABLES		
PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTO, COMBINACIÓN Y CARGA		
R <sub>1</sub>	800.00	m <sup>3</sup> /d Rendimiento de fabricación (propuesta por defecto, R <sub>1</sub> =800 m <sup>3</sup> /día)
p <sub>1</sub>	100.00	% Proporción de áridos de machaqueo en peso
p <sub>2</sub>	-	% Proporción de RCD en peso
d <sub>2</sub>		km Distancia desde la zona de obtención de RCD hasta la instalación
D <sub>c</sub>	2.25	t/m <sup>3</sup> Densidad de la capa construida (p.p.d., D <sub>c</sub> =2,25t/m <sup>3</sup> )
Δ	5%	% Mermas s/perfiles teóricos (p. p.d. Δ 5%)
PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): TRANSPORTE A OBRA		
d <sub>0</sub>	35.00	km Distancia desde la instalación a la obra
PROCESO UNITARIO 3 (PU 3): PUESTA EN OBRA		
M	MOTONIVEL	Medio de extendido
R <sub>2</sub>	800.00	Rend. p. obra (p.p.d., R <sub>2</sub> = 800 m <sup>3</sup> /día)

Figura 79 Inventario capa de zahorra. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

Considerándose una distancia entre la cantera y la obra igual a 35 km. El extendido se hace mediante una motoniveladora, cuyo rendimiento se considera el valor de 800 m<sup>3</sup>/día, establecido por defecto.

### Suelocemento

Los datos para una unidad funcional de 1 m<sup>3</sup> de capa construida son (Figura 80):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO: S131

VARIABLES		PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTO Y TRASPORTE A OBRA DE MP
P <sub>1</sub>	97.00 %	Proporción de suelo granular
P <sub>2</sub>	- %	Proporción de RCD o subproductos
P <sub>3</sub>	3.00 %	Proporción de cemento (p.p.d., p <sub>2</sub> =3,0%)
d <sub>1</sub>	30.00 km	Distancia de la zona de obtención de suelo granular a central de fab.
d <sub>2</sub>	- km	Distancia desde la zona de obtención de RCD hasta la obra
d <sub>3</sub>	30.00 t/m <sup>3</sup>	Distancia desde la zona de obtención de cemento hasta la obra
D <sub>c</sub>	2.27 t/m <sup>3</sup>	Densidad de la capa construida (p.p.d., D <sub>c</sub> =2,27 t/m <sup>3</sup> )
PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): FABRICACIÓN EN CENTRAL		
R <sub>2</sub>	800.00 m <sup>3</sup> /d	Producción media de la central (p.p.d., R <sub>2</sub> = 800 m <sup>3</sup> /día)
PROCESO UNITARIO 3 (PU 3): TRANSPORTE A OBRA		
R <sub>2</sub>	35.00 m <sup>3</sup> /d	Distancia desde la central a la obra
PROCESO UNITARIO 4 (PU 4): EJECUCIÓN DE OBRA		
R <sub>2</sub>	MOTONIVEL m <sup>3</sup> /d	Medio de extendido
R <sub>2</sub>	800.00 m <sup>3</sup> /d	Rendimiento de puesta en obra (p.p.d., R <sub>4</sub> = 800 m <sup>3</sup> /día)

Figura 80 Inventario capa de suelocemento. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

### Hormigón de firmes

Los datos para una unidad funcional de 1 m<sup>3</sup> de capa construida son (Figura 81):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO/SELECCIONADA: S134

VARIABLES		PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTO Y TRANSPORTE DE MP
T <sub>H</sub>	HF-4,5	Tipo de hormigón P.p.d., T <sub>H</sub> = HF-4,5
T <sub>J</sub>	SIN PASADOR	Tipo de juntas transversales P.p.d., T <sub>J</sub> = SIN PASADOR
T <sub>P</sub>	MASA	Tipo de pavimento P.p.d., T <sub>P</sub> = MASA
c <sub>1</sub>	950.00 kg	Dosificación de áridos naturales P.p.d., c <sub>1</sub> = 950 kg
c <sub>2</sub>	894.31 kg	Dosificación árido grueso de machaqueo
c <sub>4</sub>	400.00 kg	Dosificación de cemento P.p.d., c <sub>4</sub> = 400 kg
c <sub>5</sub>	- kg	Cuantía de acero de armar P.p.d., c <sub>5</sub> = - kg
c <sub>6</sub>	- kg	Acero en juntas y barras de unión P.p.d., c <sub>6</sub> = - kg
d <sub>1</sub>	30.00 km	Distancia zona de obtención áridos naturales a la central de fabricación
d <sub>2</sub>	30.00 km	Distancia zona de obtención ár. machaqueo hasta central de fabricación
d <sub>4</sub>	30.00 km	Distancia desde la zona de obtención del cemento central de fabricación
d <sub>5</sub>	- km	Distancia zona de obtención del acero hasta la central de fabricación
PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): FABRICACIÓN EN CENTRAL		
R <sub>2</sub>	700 m <sup>3</sup> /d	Producción media de la central (p.p.d., R <sub>2</sub> =700 m <sup>3</sup> /día)
PROCESO UNITARIO 3 (PU 3): TRANSPORTE A OBRA		
d <sub>0</sub>	35.00 km	Distancia desde la central a la obra
PROCESO UNITARIO 4 (PU 4): PUESTA EN OBRA		
R <sub>4</sub>	700 m <sup>3</sup> /d	Rendimiento de puesta en obra (p.p.d., R <sub>4</sub> =800 t/día)

Figura 81 Inventario capa de hormigón de firme. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

### Hormigón magro vibrado

Finalmente, los datos para una unidad funcional de 1 m<sup>3</sup> de capa construida son (Figura 82):

DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN ESTUDIO/SELECCIONADA: S134

VARIABLES	PROCESO UNITARIO 1: APROVISIONAMIENTO Y TRANSPORTE DE MP
c <sub>1</sub> 1,075.00 kg	Dosificación de áridos naturales P.p.d., c <sub>1</sub> = 1,075 kg
c <sub>2</sub> 1,205.28 kg	Dosificación árido grueso de machaqueo
c <sub>3</sub> kg	Dosificación de RCD P.p.d., c <sub>3</sub> = - kg
c <sub>4</sub> 200.00 kg	Dosificación de cemento P.p.d., c <sub>4</sub> = 200 kg
d <sub>1</sub> 30.00 km	Distancia zona de obtención áridos naturales a la central de fabricación
d <sub>2</sub> 30.00 km	Distancia zona de obtención ár. machaqueo hasta central de fabricación
d <sub>3</sub> km	Distancia zona de obtención de RCD hasta la central de fabricación
d <sub>4</sub> 30.00 km	Distancia desde la zona de obtención del cemento central de fabricación
PROCESO UNITARIO 2 (PU 2): FABRICACIÓN EN CENTRAL	
R <sub>2</sub> 700 m <sup>3</sup> /d	Producción media de la central (p.p.d., R <sub>2</sub> =700 m <sup>3</sup> /día)
PROCESO UNITARIO 3 (PU 3): TRANSPORTE A OBRA	
d <sub>0</sub> 35.00 km	Distancia desde la central a la obra
PROCESO UNITARIO 4 (PU 4): PUESTA EN OBRA	
R <sub>4</sub> 700 m <sup>3</sup> /d	Rendimiento de puesta en obra (p.p.d., R <sub>4</sub> =800 t/día)

Figura 82 Inventario hormigón magro vibrado. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

#### 6.2.1.4. Combinación explanada y firme

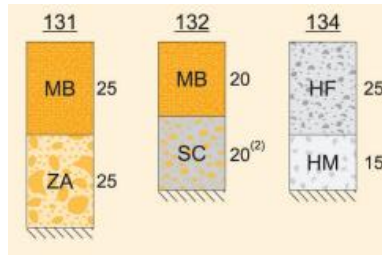
Después de inventariar todos los datos de los tipos de materiales que conforman la explanada y el firme, es necesario ver qué combinaciones nos permite realizar la herramienta y definir los espesores de cada una de las capas.

Para este caso práctico, los diseños de sección son los siguientes (Figura 83):

SECCIONES DE FIRME OBJETO DE COMPARACIÓN					INTRODUCCIÓN DE DATOS		
RED AUTONÓMICA ARAGONESA	SUBCATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO T1 (espesores de capa en cm)				ELECCIÓN DE ESPESORES DE MBC		
		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 2	
CATEGORÍA DE LA EXPLANADA	EX 1 (BAJA)	MB 30 ZA 40 T1EX1ZA MB	MB 20 SC 30 T1EX1SC MB	HF 25 HMV 15 ZA 15 T1EX1HF	CAPA	cm	cm
	EX 2 (MEDIA)	MB 28 ZA 25 T1EX2ZA MB	MB 20 SC 25 T1EX2SC MB	HF 25 HMV 15 T1EX2HF	RODADUR		
	EX 3 (ALTA)	MB 28 T1EX3ZA MB	MB 18 SC 22 T1EX3SC MB	HF 25 HMV 15 T1EX3HF	INTERMED		
					BASE		
					TOTAL	-	-
					CAPA	cm	cm
					RODADUR		
					INTERMED		
					BASE		
					TOTAL	-	-
					CAPA	cm	cm
					RODADUR	3.5	3.0
					INTERMED	10.0	5.0
					BASE	14.5	10.0
					TOTAL	28.0	18.0
MB: Mezcla Bituminosa      SC: Suelo Cemento      ZA: Zahorra					SELECCIONAR EXPLANADA + FIRME		
					VOLVER A MENÚ PRINCIPAL		

Figura 83 Posibles secciones de explanada y firme. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

Los espesores se han definido siguiendo las especificaciones de la *Tabla 6. Espesor de capas de mezcla bituminosa en caliente (Norma 6.1.-IC)*. Es importante mencionar que, según ésta, la capa de rodadura debería tener un espesor de 3 cm. Sin embargo, el máximo valor permitido en el programa para la capa de base es de 14,5 cm. Por este motivo, ha sido necesario aumentar el espesor de la capa de rodadura hasta los 3,5 cm. Nótese también que las soluciones que propone el programa no son exactamente las mismas que las proporcionada en la norma para este mismo tipo de categoría de tráfico (T1) y explanada (E3) (*Figura 84*).



*Figura 84 Secciones firme (T1 sobre E3). Fuente: Norma 6.1-IC.*

## 6.2.2. Fase mantenimiento y rehabilitación

El proceso de definición de las operaciones de mantenimiento y rehabilitación lleva inherente una gran dificultad, variando mucho en función de diferentes factores. Los trabajos a realizar no sólo dependen de la categoría de tráfico o del tipo de sección definida, sino que también influyen las condiciones meteorológicas, la correcta ejecución de la obra, etc. Por este motivo, es difícil encontrar un documento o guía donde se recoja, para cada tipo de sección, las operaciones a realizar.

Para poder hacer el inventario de esta fase, se dividen las operaciones de mantenimiento entre las de tipo superficial y las estructurales. Además, dentro de esta clasificación, algunas se aplican a las secciones flexibles (S131 y S132) y otras a la rígida (S134).

### 6.2.2.1. Operaciones

En este punto, de todas las operaciones permitidas en el programa, se describen las que se van a emplear en cada caso, el principal motivo y la frecuencia de aplicación.

En relación al mantenimiento superficial, la operación escogida dentro de un periodo de 20 años es:

- **Rehabilitación superficial con mezclas bituminosas:** se basa en la aplicación de un riego y una capa de mezcla bituminosa sobre la capa de rodadura del firme. Con este método se consigue volver al estado inicial del firme. El espesor de capa considerado en este caso es de 5 cm, sobre el 100% de la superficie, y se aplica a los 10 años desde la construcción de la carretera, en las secciones con firmes bituminosos (S131 y S132).



En referencia al mantenimiento estructural, se definen:

- Eliminación, reposición y recrecimiento con mezclas bituminosas: este proceso consiste en el fresado de parte de la sección de firme existente y la reposición con nuevas capas de material. La operación se realiza cuando el comportamiento del firme es inferior al esperado. En el presente estudio, se realiza el fresado de los 13,5 cm desde la superficie y su respectiva reposición, en diferentes capas y aplicando los riegos entre ellas. El proceso se aplica también en las dos secciones flexibles.
- Recrecio con hormigón: consiste en la extensión de un pavimento de hormigón sobre todo el tramo. El recrecio puede realizarse mediante un pavimento de hormigón continuo armado u hormigón en masa. En este caso, tal y como se especifica en la *Tabla 8. Espesores mínimos de recrecio mediante pavimento de hormigón vibrado (Orden Circular 9/2002 Rehabilitación de firmes)*, el espesor mínimo para una categoría T1 y un hormigón HP-4,5 es de 21 cm. Durante el intervalo temporal analizado, se considera un recrecio con hormigón en masa para la sección S134, aplicándose en el año 20.

Es importante mencionar que, en el caso de los pavimentos de hormigón, antes de proceder a la aplicación del recrecio, se realizan operaciones puntuales y localizadas para reparar las zonas del firme que presenten deterioros. Por ejemplo, para evitar el deterioro de las juntas, éstas suelen resellarse periódicamente. No obstante, esta operación no se encuentra disponible en la presente herramienta.

La figura que se adjunta a continuación (*Figura 85*) resume, de un modo más visual, las diferentes operaciones explicadas para cada una de las secciones.

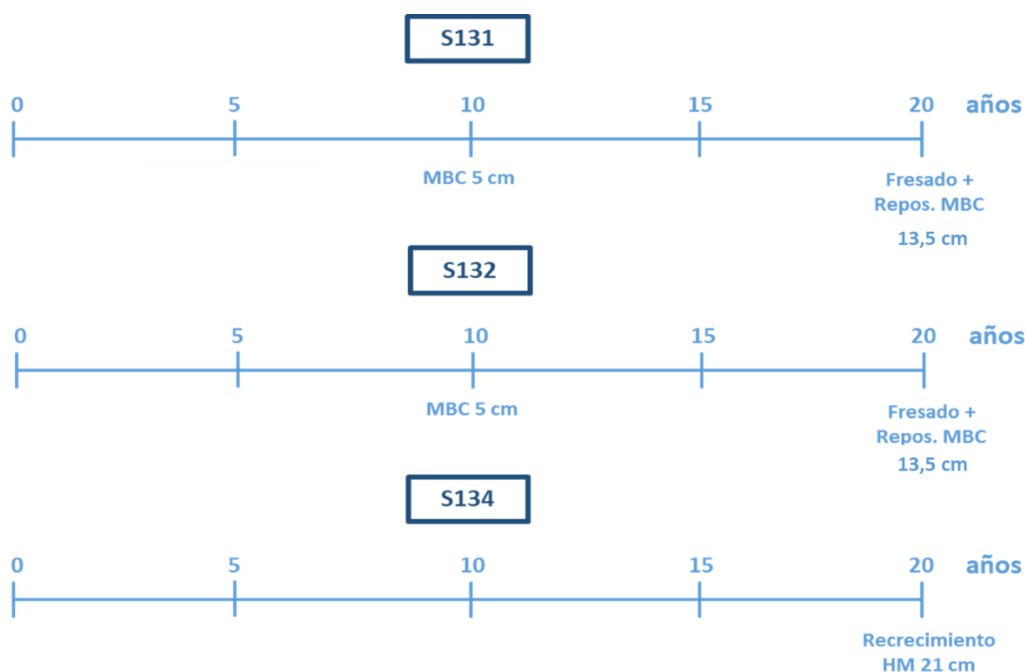


Figura 85 Operaciones de mantenimiento y rehabilitación. Fuente: Elaboración propia.

En el *Anejo 1. Caso práctico 1 – Inventario y resultados* se pueden consultar todos los datos introducidos para el inventariado de la etapa de mantenimiento y conservación del firme.

### 6.2.2.2. Materiales

Tras la definición de las operaciones, es preciso realizar un inventario de todos los materiales necesarios para realizarlas. En las operaciones de reposición del firme mediante mezclas bituminosas, tanto para la capa de rodadura como la intermedia, se utilizan los mismos materiales que en el apartado 6.2.1.3. *Materiales del firme*. Lo mismo ocurre con el hormigón magro.

## 6.3. Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

En esta tercera etapa del ACV, se deben asignar los datos del inventario del punto anterior a las categorías de impacto escogidas. Todos ellos deben estar referenciados a la unidad funcional, en este caso, 1 m<sup>2</sup> de sección.

La presente herramienta considera un total de 5 categorías de impacto, siendo éstas:

- MPp [kg]: Materias Primas pétreas
- MPnp [kg]: Materias Primas no pétreas
- DEA [kWh]: Demanda Acumulada de Energía
- ICC [kg CO<sub>2</sub> eq]: Indicador de Cambio Climático
- RMP [kg]: Residuos usados como Materias Primas

Al estar trabajando con un *software* ya preparado para la evaluación ambiental de firmes, este proceso se obtiene de forma automática al introducir las variables del inventario. El programa proporciona los impactos asociados a cada una de las categorías y para cada una de las capas que conforman la sección (explanada y firme, además de la combinación de ambas). Todos los resultados se encuentran disponibles en el *Anejo 1. Caso práctico 1 – Inventario y resultados*.

## 6.4. Interpretación de los resultados

La evaluación ambiental del inventario realizada en el punto anterior, permite conocer los resultados del presente caso. En este apartado, se procede al análisis exhaustivo de éstos, con el objetivo de poder comparar las secciones entre sí y extraer las respectivas conclusiones.

La metodología seguida se basa, en primer lugar, en la comparación de los impactos asociados a la obtención de los materiales y la fabricación y puesta en obra de una tonelada de mezcla bituminosa y una tonelada de hormigón. De este modo, se puede llegar a conocer qué material presenta *a priori* una mayor afectación al medio ambiente.

En segundo lugar, se procede a la comparación entre las dos secciones fabricadas a partir de firmes bituminosos, esto es, la sección S131 y S132. Se pretende poder determinar cuál es la mejor alternativa, si la formada por zahorra artificial o por suelocemento.

En tercer lugar, se procede a la comparación de las tres secciones, incluyendo los resultados de la sección rígida S134.

Por último, en relación a los resultados de la etapa de mantenimiento y conservación, se analiza el impacto asociado a cada una de las operaciones contempladas, determinando aquellas que se convierten en la mejor opción.

El último punto del apartado se dedica a la comparación entre las diferentes etapas del CV analizadas y para los tres tipos de secciones. Todo ello, permite poder llegar a las conclusiones finales del proyecto y que se presentan en el *Capítulo 8. Conclusiones*.

#### 6.4.1. Comparación entre firmes flexibles y rígidos

Resulta de especial interés conocer los impactos asociados a la fabricación de los materiales del firme. Concretamente, se pretende analizar qué impacto genera la fabricación y puesta en obra de una tonelada de mezcla bituminosa y otra de hormigón.

Dentro de las mezclas bituminosas, es necesario distinguir entre los tres tipos utilizados, dependiendo de si forman parte de la capa de rodadura, intermedia o base. En la siguiente tabla (*Tabla 10*) se muestran los resultados de los impactos asociados a cada categoría de impacto para la fabricación y puesta en obra de una tonelada de cada una de ellas.

*Tabla 10 Resultados de la fabricación y construcción de 1 tn de mezcla bituminosa. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.*

TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE IMPACTO				
	MPp [kg]	MPnp [kg]	DEA [kWh]	ICC [kg CO <sub>2</sub> eq]	RMP [kg]
BBTM 11B 45/80-65 (Rodadura)	1.671,69	63,57	193,47	50,16	0,00
AC22 35/50 BIN S (Intermedia)	1.669,64	58,96	168,03	40,87	0,00
AC22 35/50 BASE G (Base)	1.674,88	55,75	165,69	40,21	0,00

Tal y como puede observarse, los resultados obtenidos para las tres mezclas presentan unos valores muy parecidos en todas las categorías analizadas. A modo general, la mezcla de tipo discontinuo BBTM 11B de la capa de rodadura es aquella que lleva asociado un mayor impacto ambiental.

La única categoría en la que ésta no obtiene el valor más elevado es en la cantidad de Materias Primas pétreas [MPp]. Para esta categoría, es la mezcla de la capa base la que produce más impacto, generando un total de 1.674,88 kg de residuos por cada tonelada de fabricación y construcción. Este hecho se debe a que por cada tonelada de material fabricado, el porcentaje de árido de machaqueo es del 95,80%. En el caso de las mezclas de la capa intermedia y rodadura, este valor es ligeramente menor, siendo el 95,50% y 93,20% (al que debe añadirse un 2% de polvo mineral calizo), respectivamente.

En relación a las Materias Primas no pétreas [MPnp], básicamente el ligante hidrocarbonado, la capa de rodadura es la que mayor impacto presenta, seguida de la intermedia y la base. Este resultado es coherente con el hecho de que los porcentajes de betún utilizados son 4,80, 4,50 y 4,20%. La fabricación del betún es un proceso realizado a elevadas temperaturas, en el que se requiere un gasto considerable de energía y en el que se emite una gran cantidad de gases contaminantes. Por este motivo, también resulta lógico que, a mayor cantidad de betún, el

consumo de energía en kWh sea mayor, así como los kg de CO<sub>2</sub> equivalente emitidos a la atmósfera.

Nótese que en la categoría de Residuos usados como Materias Primas [RMP] los valores obtenidos son cero en todos los casos. Esto se debe a que, una de las hipótesis consideradas en el inventario es que, durante la fabricación de todos los tipos de materiales, el porcentaje de materiales reciclados utilizados es nulo. En caso de considerar materiales provenientes de procesos como el fresado, estos pasarían a tomar valores positivos.

Si se procede al análisis de los hormigones, debe hacerse una distinción entre el hormigón de firme y el hormigón magro, utilizado en la capa inmediatamente inferior. En este caso, los valores obtenidos para un m<sup>3</sup> de material son (*Tabla 11*):

*Tabla 11 Resultados de la fabricación y construcción de 1 m<sup>3</sup> de hormigón. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.*

TIPO DE HORMIGÓN	CATEGORÍA DE IMPACTO				
	MPp [kg]	MPnp [kg]	DEA [kWh]	ICC [kg CO <sub>2</sub> eq]	RMP [kg]
Hormigón de firmes	3.198,75	53,58	510,45	380,25	0,00
Hormigón magro vibrado	3.405,79	30,44	304,77	201,24	0,00

De los resultados de la tabla anterior, se aprecia que la única categoría en la que el Hormigón Magro vibrado (HM) presenta unos valores superiores es en la cantidad de MPp. Precisamente, para la fabricación de un m<sup>3</sup> de este material son necesarios 2.280,28 kg de árido (valor obtenido de la suma de áridos naturales y de machaqueo), frente a los 1.844,31 kg del Hormigón de Firmes (HF).

El HF, por el contrario, es el que genera unos impactos mayores en el resto de categorías. La cantidad de materias no pétreas, es decir, el cemento, necesaria para 1 m<sup>3</sup> es de 400 kg mientras que para el HM este valor se reduce a la mitad, 200 kg, por lo que los residuos son directamente proporcionales a la cantidad de material utilizado.

Durante la fabricación del cemento, para la obtención del clínker en el horno, se trabaja con temperaturas próximas a los 1.500°C y, a la salida del horno, durante el proceso de enfriamiento, ésta se reduce hasta los 100°C. Todo ello conlleva un gasto muy importante de energía, traducido en un incremento del consumo de kWh y en una generación importante de gases, especialmente CO<sub>2</sub>, hecho que influye en el crecimiento del resultado de las categorías de DEA e ICC.

Tras analizar las mezclas y los hormigones entre sí, y para realizar la comparación entre estos dos tipos de material, se toma como aproximación el cálculo de los valores medios a partir de los resultados de las *Tablas 10 y 11*. No obstante, las unidades de trabajo son la tonelada frente al metro cúbico. Por lo tanto, lo que se hace es tomar una densidad referencia del hormigón de 2.400 kg/m<sup>3</sup>. Se es totalmente consciente que estas hipótesis llevan a unos resultados aproximados, pero que sirven para poder obtener una idea general de qué tipo de material presenta unas mejores prestaciones ambientales.

Tabla 12 Comparación entre la fabricación de 1 tn de MB y hormigón. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

TIPO DE MATERIAL	CATEGORÍA DE IMPACTO				
	MPp [kg]	MPnp [kg]	DEA [kWh]	ICC [kg CO <sub>2</sub> eq]	RMP [kg]
Mezcla bituminosa	1.672,07	59,43	175,73	43,75	0,00
Hormigón	1.375,95	17,50	169,84	121,14	0,00

De los resultados anteriores se obtiene que, para la fabricación y puesta en obra de una tonelada de mezcla bituminosa, los residuos generados (tanto de tipo pétreo como no pétreo) son superiores a los de la fabricación de una tonelada de hormigón. Esta diferencia es especialmente notable en el segundo caso, en la categoría MPnp.

Si se compara el gasto de energía, traducido en consumo de kWh, puede observarse como la diferencia es muy poca, siendo ligeramente mayor en las MB. Sin embargo, si se considera una densidad del hormigón igual o inferior a 2.300 kg/m<sup>3</sup>, el hormigón pasa a tener un mayor consumo energético.

Por último, en relación a la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, es decir, el valor del indicador de la categoría ICC en kg de CO<sub>2</sub> equivalente, es aproximadamente 3 veces mayor en el caso de los hormigones. Por lo tanto, atmosféricamente, la fabricación y puesta en obra de una tonelada de hormigón resulta mucho más contaminante que la de mezcla bituminosa.

#### 6.4.2. Comparación entre las secciones flexibles (S131 y S132)

Una vez hecha la comparación entre los dos tipos de materiales anteriores, se procede al análisis de los resultados de las secciones con material bituminoso, o sea, la S131 y la S132. La primera contiene, bajo las capas de MB, una capa de zahorra artificial, mientras que en la segunda es de suelocemento.

Para una unidad funcional de un m<sup>3</sup> de estos dos materiales, los valores de las categorías de impacto que se obtienen son (Tabla 13):

Tabla 13 Comparación entre la fabricación de 1 m<sup>3</sup> de ZA y SC. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

TIPO DE MATERIAL	CATEGORÍA DE IMPACTO				
	MPp [kg]	MPnp [kg]	DEA [kWh]	ICC [kg CO <sub>2</sub> eq]	RMP [kg]
Zahorra artificial (ZA)	2.598,88	3,56	42,29	10,54	0,00
Suelocemento (SC)	2.563,72	13,46	142,46	77,52	0,00

En la categoría de MPp, la ZA obtiene unos valores ligeramente mayores, al estar compuesta en su totalidad por áridos de machaqueo. Contrariamente, en el resto de categorías, los resultados del SC son considerablemente superiores. Siguiendo la misma línea que en el apartado anterior, para la fabricación en central de 1 m<sup>3</sup> de suelocemento es necesario un 3% de cemento, hecho que explica los resultados.

Si ahora se analiza el global de las secciones, considerando todas las capas de materiales del firme y los riegos aplicados entre ellas, además de los espesores, se obtienen los siguientes valores (*Tabla 14*):

*Tabla 14 Comparación entre las secciones S131 y S132. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.*

TIPO DE SECCIÓN	CATEGORÍA DE IMPACTO				
	MPp [kg]	MPnp [kg]	DEA [kWh]	ICC [kg CO <sub>2</sub> eq]	RMP [kg]
S131	532,81	20,40	76,85	31,00	0,00
S132	929,61	17,37	91,20	43,91	0,00

Demostrado queda que, en global, la sección de suelocemento (S132) presenta una mayor afectación al entorno, siendo los impactos en cuatro de las cinco categorías mayores. La única categoría donde el valor de la S132 es el 85% del de la S131 es en MPnp. Esto se explica porque, a pesar del cemento del SC, el espesor de capas de MB en la S131 es de 28 cm, frente a los 18 cm de la S132, por lo que las cantidades de betún influyen proporcionalmente en el aumento de los residuos no pétreos.

#### 6.4.3. Comparación de todas las secciones analizadas

Para terminar con el análisis de los resultados en las etapas de obtención de los materiales, fabricación y puesta en obra, se comparan las tres secciones analizadas en este *Caso práctico 1*. Los valores que se obtienen son los siguientes (*Tabla 15*):

*Tabla 15 Comparación entre las secciones S131, S132 y S134. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.*

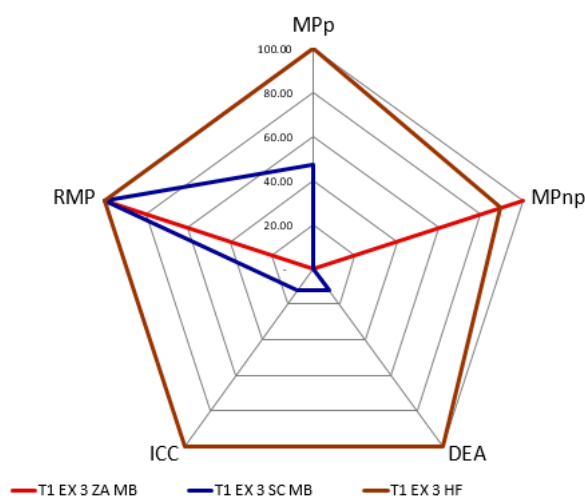
TIPO DE SECCIÓN	CATEGORÍA DE IMPACTO				
	MPp [kg]	MPnp [kg]	DEA [kWh]	ICC [kg CO <sub>2</sub> eq]	RMP [kg]
S131	532,81	20,40	76,85	31,00	0,00
S132	929,61	17,37	91,20	43,91	0,00
S134	1.376,02	20,08	192,76	134,14	0,00

La sección S134, de tipo rígido, genera unos impactos considerablemente mayores a los de las secciones con mezclas bituminosas, agudizándose esta diferencia en las emisiones de gases de efecto invernadero (ICC). La única categoría donde la S134 se encuentra en segunda posición es la de MPnp, por lo que lleva a pensar que la fabricación del betún genera más residuos de tipo no pétreo que el cemento. En segunda posición quedaría la sección S132 y finalmente la S131, tal y como queda reflejado en la comparativa del punto anterior (*punto 6.4.2. Comparación entre las secciones flexibles (S131 y S132)*).

Si se desea comparar los resultados en valores relativos (*Tabla 16*) y gráficamente (*Figura 86*) se obtiene:

*Tabla 16 Comparación relativa entre las secciones S131, S132 y S134. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.*

TIPO DE SECCIÓN	CATEGORÍA DE IMPACTO				
	MPp [kg]	MPnp [kg]	DEA [kWh]	ICC [kg CO <sub>2</sub> eq]	RMP [kg]
S131	-	100,00	-	-	100,00
S132	47,06	-	12,38	12,51	100,00
S134	100,00	89,47	100,00	100,00	100,00



*Figura 86 Resultados relativos secciones S131, S132 y S134. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.*

#### 6.4.4. Comparación de las operaciones de mantenimiento

Como ya ha quedado descrito en el inventario (*punto 6.2.2. Fase mantenimiento y rehabilitación*), se consideran un total de tres operaciones, una de ellas de tipo superficial y las dos restantes de tipo estructural.

Los resultados de cada una de ellas se adjuntan en la siguiente tabla (*Tabla 17*):

*Tabla 17 Operaciones de mantenimiento superficial y estructural. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.*

	TIPO DE OPERACIÓN	CATEGORÍA DE IMPACTO				
		MPp [kg]	MPnp [kg]	DEA [kWh]	ICC [kg CO <sub>2</sub> eq]	RMP [kg]
SUP.	MBC 5cm	200,60	7,87	23,69	6,14	0,00
EST.	Fresado + Repos. MBC 13,5cm	541,14	19,97	57,52	14,26	0,00
	Recrecimiento HM 21cm	715,22	6,39	64,00	42,26	0,00

De todas las operaciones analizadas, la que genera unos impactos menores en todas las categorías es la aplicación sobre la superficie de rodadura de una capa de 5 cm de MB. Los resultados parecen coherentes puesto que el espesor y, en consecuencia, el material utilizado en esta actuación superficial es notablemente inferior al de las de tipo estructural.

Si se analizan ahora las operaciones estructurales, el fresado y la reposición de los primeros 13,5 cm de firme genera una cantidad mayor de residuos de tipo no pétreo que el recrecimiento con hormigón. La cantidad de residuos pétreos es significativamente menor, al ser una capa de 13,5 cm frente a los 21 del hormigón. La cantidad de energía en kWh también es ligeramente superior en la actuación con el firme rígido. Pero donde más se agudiza la diferencia de valores es en las emisiones de gases de efecto invernadero, donde el hormigón genera el triple de kg de CO<sub>2</sub> equivalente.

Una vez analizada la etapa de mantenimiento, resulta también interesante poder compararla con la etapa de fabricación y puesta en obra de las secciones. A continuación, se muestran tres tablas (*Tabla 18, 19 y 20*) donde se comparan estas dos etapas, para cada tipo de sección, y para los cinco tipos de categorías de impacto analizadas. Es importante tener en cuenta que en las secciones S131 y S132 se ha considerado una operación superficial y una estructural (reposición de 5 cm de MB y el fresado y reposición de 13,5 cm de MB), mientras que en la S134 la operación estructural de reposición de 21 cm de HM. El valor total de los impactos de mantenimiento se ha calculado como la suma de las operaciones.

*Tabla 18 Resultados etapas CV S131. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.*

SECCIÓN S131	CATEGORÍA DE IMPACTO				
	MPp [kg]	MPnp [kg]	DEA [kWh]	ICC [kg CO <sub>2</sub> eq]	RMP [kg]
Fab. y const.	532,81	20,4	76,85	31,00	0,00
Mant. y rehab.	741,76	27,84	81,21	20,4	0,00
TOTAL	1.274,57	48,24	158,06	51,4	0,00

*Tabla 19 Resultados etapas CV S132. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.*

SECCIÓN S132	CATEGORÍA DE IMPACTO				
	MPp [kg]	MPnp [kg]	DEA [kWh]	ICC [kg CO <sub>2</sub> eq]	RMP [kg]
Fab. y const.	929,61	17,37	91,20	43,91	0,00
Mant. y rehab.	741,76	27,84	81,21	20,4	0,00
TOTAL	1.671,37	45,21	172,41	64,31	0,00

*Tabla 20 Resultados etapas CV S134. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.*

SECCIÓN S134	CATEGORÍA DE IMPACTO				
	MPp [kg]	MPnp [kg]	DEA [kWh]	ICC [kg CO <sub>2</sub> eq]	RMP [kg]
Fab. y const.	1376,02	20,08	192,76	134,14	0,00
Mant. y rehab.	715,22	6,39	64,00	42,26	0,00
TOTAL	2.091,24	26,47	256,76	176,40	0,00



Además de los valores numéricos, se adjuntan los mismos resultados pero gráficamente (*Figuras 87 y 88*). Se omite la representación de la categoría Residuos usados como Materias Primas (RMP) por ser todos sus valores nulos.

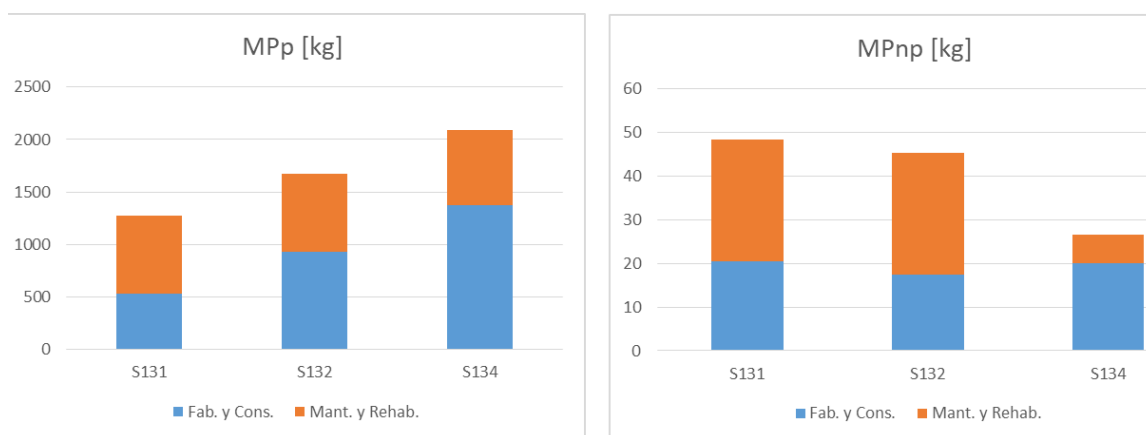


Figura 87 Resultados MPp y MPnp para todas las etapas del CV. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

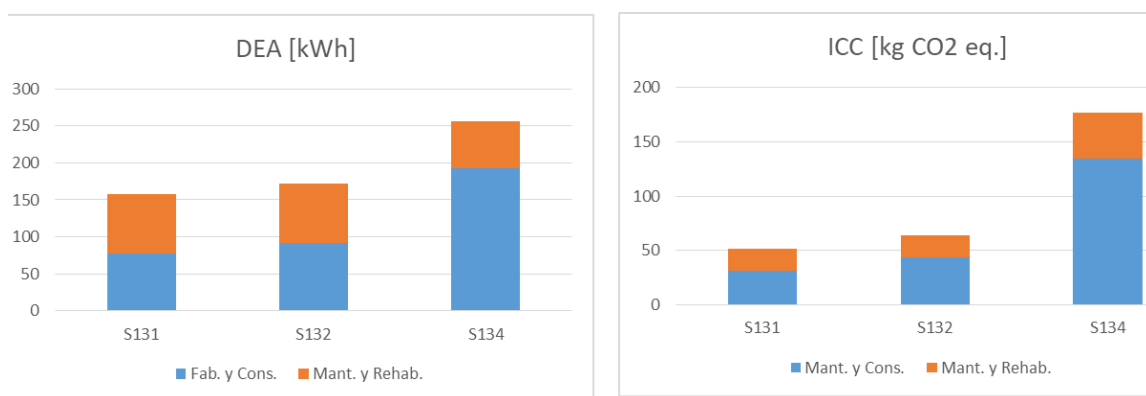


Figura 88 Resultados DEA e ICC para todas las etapas del CV. Fuente: Herramienta Gob. Aragón.

En el caso de la sección S131, la fase de mantenimiento y rehabilitación presenta unos impactos superiores a la fase de fabricación y construcción. Esta diferencia es especialmente notable en las categorías de residuos pétreos y no pétreos (MPp y MPnp), donde los resultados de la fabricación son aproximadamente un 25% más bajos que los de la etapa de mantenimiento. Este hecho se explica por la gran cantidad de material necesario para realizar las dos actuaciones. La única categoría de impacto dónde el mantenimiento presenta unos menores impactos es la ICC.

Si se analiza la sección S132, la etapa de fabricación genera unos mayores impactos en las categorías de MPp, DEA e ICC. La única categoría donde el mantenimiento y rehabilitación presenta unos resultados más elevados es en la MPnp, al contener los dos tipos de actuaciones betún.

En el caso de la sección rígida (S134), la etapa de fabricación es mucho más impactante que la de mantenimiento. Los hormigones son un material que no requiere de actuaciones de conservación tan periódicas como las mezclas bituminosas. No obstante, en este ejemplo figurado, únicamente se ha considerado la operación de recrecimiento. Si se hubiesen tenido en cuenta las actuaciones puntuales, los resultados de la etapa de mantenimiento serían más elevados.

Con todo ello, se puede llegar a la conclusión de que los resultados varían mucho en función de la estrategia de mantenimiento del firme que se escoja. Finalmente, valorando todas las etapas del ciclo de vida analizadas, la sección S134 sigue siendo la que presenta un mayor riesgo medioambiental.

## Capítulo 7

### CASO PRÁCTICO 2 – HERRAMIENTA IECA

Del mismo modo que en el capítulo anterior, *Capítulo 6. Caso práctico 1 – Herramienta Gobierno de Aragón*, se procede a la realización completa de un ACVF, pero en este caso, mediante la herramienta de Evaluación del ACVF y CCVF de las secciones de firme, creada por el IECA. En las próximas páginas, se explica con detalle todas las etapas incluidas en el Análisis del Ciclo de Vida para, finalmente, poder extraer las conclusiones a partir de los resultados que se obtengan.

#### 7.1. Definición del objetivo, alcance y límites del sistema

El objetivo principal del presente ejemplo, al igual que en el *Caso práctico 1*, es conocer los impactos ambientales asociados a tres secciones de firme diferentes, para un periodo de estudio de 20 años. La definición de éstas se realiza siguiendo las especificaciones de la Norma 6.1.-IC, de manera que todas ellas se incluyan en una categoría de tráfico pesado T1 y para una explanada de tipo E3 (*Figura 89*).

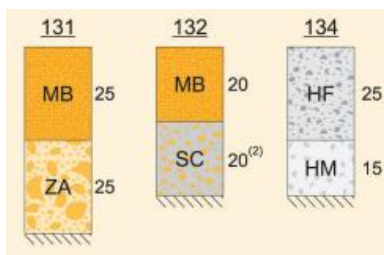


Figura 89 Secciones firme (T1 sobre E3). Fuente: Norma 6.1-IC.

En este caso, la unidad funcional con la que se trabaja es 1 km de longitud de sección, incluyendo la calzada, con dos carriles de circulación, y los arcenes interior y exterior. Siguiendo el mismo procedimiento que en el otro caso, se analizan dos secciones de firme bituminoso (una sobre suelocemento y otra sobre capa granular) y una tercera sección de tipo rígido, construida con hormigón.

Por último, los límites del sistema incluyen las etapas de fabricación de los materiales, la puesta en obra, el transporte y las operaciones de mantenimiento y rehabilitación. Por lo tanto, queda excluida la etapa de fin de vida del firme.

Adicionalmente al ACVF definido, al tratarse de una herramienta combinada capaz de realizar análisis ambientales y económicos, se hacen también los CCVs de las tres secciones.

## 7.2. Análisis de Inventario del Ciclo de Vida

Para la elaboración del inventario, el programa requiere de la introducción de una serie de datos. Todos ellos se explican con detalle en el *punto 5.2.3. Evaluación del ACVF y CCVF de las secciones de firme*, concretamente en el *apartado 5.2.3.2. Modo de trabajo*.

En esta segunda etapa, se introduce la totalidad de variables necesarias para la elaboración del ACV y CCV de cada uno de los tipos de sección. Se distinguen, por un lado, los *inputs* asociados a los datos generales de la sección (materiales de las capas, espesores, distancias de transporte, etc.) y, por otro lado, los datos relativos a las operaciones de mantenimiento y rehabilitación.

Estableciendo la misma metodología que en el ACV utilizando la Herramienta del Gobierno de Aragón, se toman las siguientes hipótesis:

- Se procura, en la medida de lo posible, que las variables introducidas en ambos casos tomen los mismos valores.
- Las distancias de transporte se consideran las mismas para los tres tipos de sección, independientemente del material utilizado. Se consigue así que el transporte influya del mismo modo en todos los ACVs, permitiendo aislar mejor las etapas de fabricación y puesta obra, de mayor interés en el presente estudio.

Asimismo, se proporcionan también todas las variables consideradas para los tres análisis económicos (CCVs). Todos los datos utilizados se encuentran disponibles para su consulta en el *Anejo 2. Caso práctico 2 – Inventario y resultados*.

### 7.2.1. Datos generales de la sección

El primer paso en el inventario debe ser la definición de la sección, introduciéndose el nombre de ésta y los años de estudio. Para ello, como ya se ha comentado, se considera un periodo de evaluación de 20 años, coincidiendo con el periodo de evaluación de las operaciones de mantenimiento en el *Caso práctico 1*.

Se presenta, a modo de ejemplo, los datos para la Sección 131 (*Figura 90*).

NOMBRE DE LA SECCIÓN	131	
PERÍODO DE ESTUDIO	20	AÑOS

*Figura 90 Definición sección y período de estudio. Fuente: Herramienta IECA.*

#### 7.2.1.1. Definición de la calzada

En relación a las dimensiones de la calzada, ésta se considera de doble carril, con una longitud de 1.000 metros y un ancho de 7 (*Figura 91*). La anchura se define siguiendo las especificaciones de la *Tabla 7.1. Dimensiones de la sección transversal (Norma 3.1-IC Trazado)*, donde cada uno de los carriles debe tener un ancho de 3,5 metros.

<b>CALZADA</b>		
<b>LONGITUD</b>	<b>1000</b>	<b>m</b>
<b>ANCHO</b>	<b>7.00</b>	<b>m</b>

Figura 91 Dimensiones calzada. Fuente: Herramienta IECA.

Los materiales y espesores de las capas que conforman la calzada dependen de la sección que se esté analizando, dividiéndose su inventario en los tres casos estudiados. En un principio, los espesores de las capas bituminosas se consideran los mismos que en la tesis de Moral (Moral, A., 2016), cumpliendo con la *Tabla 6. Espesor de capas de mezcla bituminosa en caliente (Norma 6.1-IC)*. Sin embargo, las secciones de la tesis no incluyen los arcenes. Al incluirlos, es necesario modificar algunos espesores para también poder cumplir con las especificaciones de la normativa sobre arcenes (explicadas en el siguiente punto 7.2.1.2. *Definición de los arcenes*).

### Sección 131

Los materiales y respectivos espesores de la sección S131 son (Figura 92):

TIPO DE MATERIAL	ESPEJOR (cm)
Capa de rodadura de MB	3
Capa intermedia de MB	5
Capa de base de MB	7
Capa de base de MB	10
Zahorra artificial	25

Figura 92 Materiales y espesores Sección 131. Fuente: Herramienta IECA.

### Sección 132

Los materiales y respectivos espesores de la sección S132 son (Figura 93):

TIPO DE MATERIAL	ESPEJOR (cm)
Capa de rodadura de Microaglomerado	3
Capa intermedia de MB	7
Capa de base de MB	10
Suelocemento	20

Figura 93 Materiales y espesores Sección 132. Fuente: Herramienta IECA.

### Sección 134

Los materiales y respectivos espesores de la sección S134 son (Figura 94):

TIPO DE MATERIAL	ESPEJOR (cm)
Hormigón en masa HF-4,5	25
Hormigón magro	15

Figura 94 Materiales y espesores Sección 134. Fuente: Herramienta IECA.

Nótese que únicamente es posible la introducción del tipo de material, sin proporcionar más detalle. Por ejemplo, en el caso de las mezclas bituminosas, no es posible definir de qué tipo de mezcla se trata. Lo mismo ocurre con el hormigón.

### 7.2.1.2. Definición de los arcenes

La anchura de los arcenes también cumple con lo citado en la *Norma 3.1-IC*. Para el arcén exterior o derecho, se toma un valor de 2,5 metros y, para el arcén interior o izquierdo, el ancho es de 1 metro. En cuanto a los materiales y sus espesores, éstos se distinguen según la sección.

#### Sección 131

Las capas de rodadura e intermedia son una prolongación de la calzada, por lo que su naturaleza es idéntica. También se prolonga la primera de las capas de la base, de 7 cm, para garantizar el espesor mínimo de 12, cumpliendo así con lo citado en el *Capítulo 7. Arcenes (Norma 6.1-IC)*. El resto del espesor hasta la explanada, eso es, 30 cm, se rellena con zahorra artificial.

ARCÉN EXTERIOR			ARCÉN INTERIOR		
ANCHO	2.50	m	ANCHO	1.00	m
	TIPO DE MATERIAL	ESPESOR (cm)		TIPO DE MATERIAL	ESPESOR (cm)
CAPA 1	Capa de rodadura de MB	3	CAPA 1	Capa de rodadura de MB	3
CAPA 2	Capa intermedia de MB	5	CAPA 2	Capa intermedia de MB	5
CAPA 3	Capa de base de MB	7	CAPA 3	Capa de base de MB	7
CAPA 4	Zahorra artificial	30	CAPA 4	Zahorra artificial	30

Figura 95 Dimensiones arcenes S131. Fuente: Herramienta IECA.

#### Sección 132

Para la sección de firme sobre suelocemento, la capa de mezcla bituminosa de los arcenes debe tener un espesor mínimo de 10 cm, por lo que la capa de rodadura e intermedia tienen 3 y 7 cm, respectivamente. Se enrasa con suelocemento hasta la cara inferior de las MB de la calzada, es decir, con una capa de 10 cm. El resto del espesor hasta llegar a la explanada se completa con zahorra artificial (*Figura 96*).

ARCÉN EXTERIOR			ARCÉN INTERIOR		
ANCHO	2.50	m	ANCHO	1.00	m
	TIPO DE MATERIAL	ESPESOR (cm)		TIPO DE MATERIAL	ESPESOR (cm)
CAPA 1	Capa de rodadura de MB	3	CAPA 1	Capa de rodadura de MB	3
CAPA 2	Capa intermedia de MB	7	CAPA 2	Capa intermedia de MB	7
CAPA 3	Suelocemento	10	CAPA 3	Suelocemento	10
CAPA 4	Zahorra artificial	20	CAPA 4	Zahorra artificial	20

Figura 96 Dimensiones arcenes S132. Fuente: Herramienta IECA.

#### Sección 134

En el caso de tener una sección rígida y para la categoría de tráfico T1, los arcenes se pueden pavimentar con hormigón o con mezcla bituminosa. En este caso, se pavimenta con hormigón HF-4,5 igual al de la calzada, con un espesor de 15 cm, y después se rellena con zahorra artificial (*Figura 97*).

ARCÉN EXTERIOR			ARCÉN INTERIOR		
ANCHO	2.50	m	ANCHO	1.00	m
	TIPO DE MATERIAL	ESPESOR (cm)		TIPO DE MATERIAL	ESPESOR (cm)
CAPA 1	Hormigón en masa HF-4,5	15	CAPA 1	Hormigón en masa HF-4,5	15
CAPA 2	Zahorra artificial	25	CAPA 2	Zahorra artificial	25

Figura 97 Dimensiones arcenes S134. Fuente: Herramienta IECA.

### 7.2.1.3. Distancias de transporte

Siguiendo la misma hipótesis que en el capítulo anterior, se toma la misma distancia de transporte para todos los materiales utilizados, un valor igual a 30 km (*Figura 98*). De esta manera, los impactos asociados a la etapa de distribución o transporte afectan del mismo modo a las tres secciones estudiadas.

DISTANCIAS DE TRANSPORTE		
MB Mezcla bituminosa	30	km
SC Suelocemento	30	km
HV Hormigón vibrado	30	km
HM Hormigón magro	30	km
GC Gravacemento	30	km
ZA Zahorra artificial	30	km
Suelo estabilizado	30	km
Media	30	km

*Figura 98 Inventario distancias de transporte materiales. Fuente: Herramienta IECA.*

### 7.2.1.4. Definición de las características de los materiales

En la presente herramienta, los impactos asociados a la fabricación de una unidad funcional de cada tipo de material han sido obtenidos de la tesis de Alberto Moral (*Moral, A., 2016*). Los únicos materiales cuyos datos han sido proporcionados por el IECA, son los diferentes tipos de hormigones.

Sin embargo, es posible modificar algunas variables para poder realizar un ACV que se ajuste a las características de cada sección. Concretamente, el programa permite introducir la densidad del material [ $\text{t/m}^3$ ], la dotación de betún [%] (en las MB y riegos), y finalmente, la dotación de filler [%] (en las MB).

Para el caso de las presentes secciones, los valores de dichas variables son (*Figura 99*):

MATERIAL	DENSIDAD $\text{t/m}^3$	DOTACIÓN BETÚN	DOTACIÓN FILLER
Zahorra artificial	2.25		
Suelocemento	2.27		
Capa de base de MB	2.33	4.20	4.62
Capa intermedia de MB	2.45	4.50	4.95
Capa de rodadura de MB	2.35	4.80	5.76
Hormigón magro	2.30		
Hormigón en masa HF-4,5	2.30		
Riego de emulsión termoadherente	1.020	0.00020	
Riego de imprimación	1.020	0.00050	

*Figura 99 Inventario densidad, % betún y % filler. Fuente: Herramienta IECA.*

En relación a las densidades, se ha establecido el mismo valor para la ZA y el SC que en el *Caso práctico 1*. Lo mismo ocurre con las dotaciones de betún de las mezclas y los riegos. Para las densidades de las mezclas bituminosas se ha consultado en la bibliografía los valores típicos y, finalmente, se ha tomado una relación filler/betún ( $f/b$ ) de 1,2 para la capa de rodadura y de 1,1 para la intermedia y base.

### 7.2.1.5. Definición de las variables económicas

En este ejemplo se realiza también un estudio económico. El programa contiene un listado con los costes promedio de unidades de obra provenientes de diferentes bases estatales. Estas unidades se clasifican en materiales, maquinaria y mano de obra.

Con el objetivo de poder trabajar con unos precios actualizados en las operaciones de mantenimiento realizadas durante todo el periodo de estudio, es necesario introducir el interés anual [%] y la tasa de inflación [%]. Los valores estipulados para las tres secciones son 1,00 y 1,50%, respectivamente (*Figura 100*).

Interés anual	1.00%
Tasa de inflación	1.50%

*Figura 200 Interés anual y tasa de inflación. Fuente: Herramienta IECA.*

### 7.2.2. Datos de mantenimiento-conservación

A lo largo de la presente tesina, se habla en numerosas ocasiones de la subjetividad asociada a las operaciones de mantenimiento de los firmes, haciendo que varíen mucho en función de cada caso.

Dentro de las posibilidades del programa, se intenta que las operaciones de mantenimiento consideradas, tanto las de tipo superficial como estructural, sean las mismas que en el primer ejemplo práctico (*ver apartado 6.2.2.1. Operaciones*). Por este motivo, para el caso de las secciones de pavimento flexible, S131 y S132, se han escogido las siguientes opciones:

- Refuerzo del pavimento de MB añadiendo una capa de 5 cm sobre la superficie de rodadura (a los 10 años).
- Reposición total del pavimento de MB, incluyendo el fresado de los 9 primeros centímetros de capa de rodadura e intermedia y su nueva aplicación (a los 20 años). El valor de 9 cm corresponde al valor medio entre las S131 y S132.

En el caso de la sección S134:

- Reposición del pavimento de hormigón (a los 20 años) con un recrecimiento de 21 cm.

El inventario de las secciones S131 y S132, considerando los espesores en los refuerzos y reposiciones, la cadencia de la operación y el porcentaje de superficie sobre el que se aplican, es el siguiente (*Figura 101*):

REPOSICIÓN PAVIMENTO	Reposición capa (cm)	Cadencia de la operación (años)	% de la superficie	Números de operaciones de mantenimiento en el período de estudio
Reposición total MB intermedia	6	20	100.00	1.00
Reposición total MB rodadura	3	20	100.00	1.00
REFUERZO PAVIMENTO	Refuerzo capa (cm)	Cadencia de la operación (años)	% de la superficie	Números de operaciones de mantenimiento en el período de estudio
Refuerzo MB rodadura	5	20	100.00	1.00
FRESADO	cm por m <sup>2</sup>	Cadencia de la operación (años)	% de la superficie	Números de operaciones de mantenimiento en el período de estudio
Fresado de pavimento	9	20	100.00	1.00

*Figura 301 Operaciones de mantenimiento S131 y S132. Fuente: Herramienta IECA.*



Los datos para la sección S134 son (Figura 102):

REFUERZO PAVIMENTO	Refuerzo capa (cm)	Cadencia de la operación (años)	% de la superficie	Números de operaciones de mantenimiento en el período de estudio
Refuerzo de espesor completo de Hmsa	21	20	100	1.00

Figura 402 Operaciones de mantenimiento S134. Fuente: Herramienta IECA.

Finalmente, es importante mencionar que el valor establecido en la “cadencia de la operación” es de 20 para que el número total de operaciones en el horizonte temporal sea de uno. Esto no significa que se realicen todas ellas en el mismo momento.

### 7.3. Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

Como ya se ha mencionado en numerosas ocasiones, en la tercera etapa de cualquier ACV deben asociarse todos los datos inventariados a las diferentes categorías de impacto. Estas últimas varían en función de la metodología escogida para el estudio, pudiendo ser de efecto intermedio (*midpoint*) o de efecto final (*endpoint*).

Del mismo modo que en el *Caso práctico 1*, el proceso de asignación de todos los *inputs* y *outputs* a las categorías es realizado de forma automática por la herramienta, en este caso, la hoja de cálculo del IECA. Esta asignación permite el cálculo de la contribución relativa de cada componente del inventario a las ocho categorías de estudio escogidas, que son:

- Calentamiento Global [kg CO<sub>2</sub> eq]
- Agotamiento de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]
- Acidificación [kg SO<sub>2</sub> eq]
- Eutrofización [kg PO<sub>4</sub> eq]
- Oxidación Fotoquímica [kg C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> eq]
- Agotamiento de Recursos Abióticos [kg Sb eq]
- Agotamiento de Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]
- Toxicidad [kg eq 1,4 DB]

Lo comentado hasta ahora se refiere únicamente a la evaluación ambiental del ejemplo. Para la evaluación económica, el programa calcula los costes asociados los datos del inventario a partir de la base de datos y unos rendimientos previamente fijados.

Todos los resultados de las secciones, tanto los ambientales como los económicos, se presentan estructurados en las etapas de construcción, transporte, mantenimiento y conservación, y por componente de la sección, es decir, de cada una de las capas (rodadura, intermedia, etc.). En el *Anejo 2. Caso práctico 2 – Inventario y resultados* se adjuntan dichos valores expresados en función de la UF de 1 km de sección. En el siguiente punto 7.4. *Interpretación de los resultados* se procede al análisis de los resultados más relevantes y a la extracción de las conclusiones pertinentes.

## 7.4. Interpretación de los resultados

La evaluación ambiental realizada en el punto anterior permite conocer cuáles son los impactos ambientales y los costes económicos asociados a cada una de las secciones analizadas. En este apartado, se procede a la interpretación de dichos resultados con el objetivo de poder determinar cuál es la sección que presenta unas mejores prestaciones, tanto medioambientales como económicas.

El procedimiento que se sigue es prácticamente idéntico al del capítulo anterior. Primeramente, en relación al ACV, se comparan los impactos asociados a la fabricación y puesta en obra de una tonelada de mezcla bituminosa frente a una tonelada de hormigón.

En segundo lugar, se cotejan los resultados de las secciones S131 y S132, para poder ver si resulta más sostenible el uso de la zahorra artificial o del suelocemento.

En tercer lugar, se evalúan conjuntamente las tres secciones (S131, S132 y S134). La comparación entre los diferentes tipos de secciones se realiza para todas las etapas del ciclo de vida consideradas.

Finalmente, en cuanto al CCV, se termina la evaluación de los resultados con el análisis económico. Se determina qué sección resulta más viable de construir, es decir, la de menores costes asociados a la etapa de fabricación y puesta en obra, así como la más económica de mantener, o sea, la de menores costes en la etapa de mantenimiento y conservación.

### 7.4.1. Comparación entre firmes flexibles y rígidos

Como se ha podido comprobar durante la elaboración del inventario, este *software* no diferencia dentro de una misma capa (rodadura, intermedia o base) entre diferentes tipos de mezcla. En el caso de los hormigones, se diferencian entre hormigón en masa (HF-3,5; HF-4,0 y HF-4,5), hormigón en masa HF-4,5 con pasadores, hormigón armado continuo y hormigón magro.

Con el objetivo de poder hacer una comparación directa entre ambos tipos de material, se calcula el valor medio de los impactos obtenidos, aun siendo consciente que esta hipótesis lleva inherente cierto error.

En la página siguiente, se presentan los resultados de los impactos asociados a cada una de las categorías analizadas, para las tres capas de firme bituminoso y los dos tipos de hormigón utilizados (*Tablas 21 y 22*). A continuación, se hace un análisis detallado de todos ellos.

Tabla 21 Resultados de la fabricación y construcción de 1 tn de mezcla bituminosa. Fuente: Herramienta IECA.

TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE IMPACTO							
	Calent. Global [kg CO <sub>2</sub> eq]	Agotamiento de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO <sub>2</sub> eq]	Eutrofización [kg PO <sub>4</sub> eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> eq]	Agotamiento Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [Kg eq 1,4 DB]
Capa de rodadura de MB	57,083	1,135E-05	0,134	0,029	0,014	4,046E-05	346,231	6.609,910
Capa intermedia de MB	57,083	1,090E-05	0,134	0,029	0,014	4,046E-05	492,171	4.842,709
Capa de base de MB	51,451	1,022E-05	0,132	0,029	0,014	4,046E-05	487,074	6.472,785
<b>MEDIA</b>	<b>55,206</b>	<b>1,082E-05</b>	<b>0,133</b>	<b>0,029</b>	<b>0,014</b>	<b>4,046E-05</b>	<b>441,825</b>	<b>5.975,135</b>

Tabla 22 Resultados de la fabricación y construcción de 1 tn de hormigón. Fuente: Herramienta IECA.

TIPO DE HORMIGÓN	CATEGORÍA DE IMPACTO							
	Calent. Global [kg CO <sub>2</sub> eq]	Agotamiento de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO <sub>2</sub> eq]	Eutrofización [kg PO <sub>4</sub> eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> eq]	Agotamiento Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [Kg eq 1,4 DB]
Hormigón en masa HF-4,5	123,480	2,413E-05	0,424	0,095	0,010	6,92E-05	1.024,000	88.622,846
Hormigón magro	81,740	2,413E-05	0,223	0,049	0,010	6,92E-05	595,050	19.060,740
<b>MEDIA</b>	<b>102,610</b>	<b>2,413E-05</b>	<b>0,324</b>	<b>0,072</b>	<b>0,010</b>	<b>6,92E-05</b>	<b>809,525</b>	<b>28.796,205</b>

Si se procede primero al análisis de los resultados de las tres capas de firme bituminoso, puede comprobarse como los valores prácticamente no difieren entre sí. Las únicas categorías donde estas diferencias son más notables son en: el Calentamiento Global, el Agotamiento de Recursos Fósiles y Energéticos y, por último, la Toxicidad. En la primera de ellas, expresada en kg de CO<sub>2</sub> equivalente, la capa base presenta un riesgo ambiental menor respecto a las otras dos restantes. Este hecho es probable que se deba a la menor cantidad de betún utilizada y, por lo tanto, a una menor cantidad de gases de efecto invernadero emitidos, que implica también que los resultados en la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono (kg de CFC<sup>-11</sup> eq) sean inferiores.

En cuanto al Agotamiento de Recursos Fósiles y Energéticos, expresado en MJ, el impacto de la capa de rodadura es aproximadamente un 30% menor al de las capas intermedias y base. Lo que esto significa es que, para una tonelada de MB, el consumo de combustibles fósiles y energía durante el proceso de obtención de las materias primas y la fabricación de la mezcla es mucho menor. Finalmente, en relación a la categoría de Toxicidad, es la mezcla de rodadura la que genera una mayor cantidad de kg eq 1,4 DB, lo que se traduce en una mayor afectación sobre los humanos y los ecosistemas acuáticos y terrestres.

Analizando ahora los dos tipos de hormigón, se observa como los resultados son más dispares, especialmente en las categorías de Calentamiento Global, Acidificación, Agotamiento de Recursos Fósiles y Energéticos y Toxicidad. En todas ellas, el hormigón HF-4,5 genera unos impactos mayores que el hormigón magro. De hecho, en la categoría de Calentamiento Global, los kg de CO<sub>2</sub> equivalente emitidos por tonelada de HF-4,5 son aproximadamente un 50% más que por tonelada de hormigón magro.

Con respecto a la Acidificación, la diferencia es de aproximadamente el doble, lo que significa que aumenta la cantidad de ácidos en la atmósfera, suelo y agua, provocando alteraciones en la flora y fauna. Lo mismo ocurre con el Agotamiento de los Recursos Fósiles, donde los valores del hormigón magro también son la mitad en comparación al HF-4,5. Por último, esta diferencia se hace mucho más notable en la categoría de Toxicidad, hasta llegar al punto de ser el hormigón magro 4 veces inferior al otro.

Una vez comparados los diferentes tipos de mezclas y hormigones entre sí, si se analizan las diferencias entre ambos tipos de material, se observa como las mezclas bituminosas representan una alternativa mucho más sostenible que los hormigones. Esto queda demostrado al ser los impactos de las MB bastante inferiores en todas las categorías, a excepción de la Oxidación Fotoquímica. Sin embargo, la diferencia en los valores de ésta última es muy pequeña.

Resulta importante destacar, por la preocupación general acerca del Calentamiento Global, que para los hormigones la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero representa el doble respecto a los firmes bituminosos.

#### **7.4.2. Comparación entre las secciones flexibles (S131 y S132)**

Una vez comprobado que la fabricación y puesta en obra de una tonelada de mezcla bituminosa representa una opción más sostenible que una tonelada de hormigón, se quiere conocer si, en conjunto, resulta mejor una sección con zahorra artificial o con suelocemento. En la página que

sigue, se muestran adjuntos los resultados para la fabricación y puesta en obra de un m<sup>3</sup> de estos dos materiales (*Tabla 23*).

La primera de las categorías analizadas es la de Calentamiento Global, donde el SC emite aproximadamente 3,5 veces más que la ZA, por lo que lleva asociado un riesgo ambiental mucho mayor. Los resultados en la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono también son de un orden mayor en el caso del suelocemento.

La diferencia en las categorías de Acidificación y Eutrofización son mucho menos pronunciadas, siendo los resultados de la ZA ligeramente superiores. Esto puede traducirse en un mayor riesgo para los ecosistemas, especialmente los acuáticos.

Para las cuatro categorías restantes (Oxidación Fotoquímica, Agotamiento de los Recursos Abióticos, Agotamiento de los Recursos Fósiles y Energéticos y, finalmente, Toxicidad) 1 m<sup>3</sup> de SC lleva asociado mayores impactos. En definitiva, a pesar de no poder agrupar todas las categorías conjuntamente, se obtiene que *a priori* la zahorra artificial parece ser una alternativa más sostenible que el suelocemento.

Si ahora se analizan las dos secciones (S131 y S132) globalmente, es decir, considerando cada una de las capas del firme y sus espesores, se obtienen los resultados que se adjuntan en la *Tabla 24*. Estos valores son los impactos asociados únicamente a la etapa de fabricación y puesta en obra (sin considerar las distancias de transporte) para una unidad funcional de 1 km de sección de firme. En el *Anejo 2. Caso práctico 2 – Inventario y resultados*, se muestran los resultados divididos por capa.

Valorando únicamente los resultados de la parte de la calzada, se obtiene que la sección S132 en la categoría de Calentamiento Global, genera un 5% más de kg de CO<sub>2</sub> equivalente con respecto a la S131. Los valores obtenidos en las categorías de Agotamiento de la Capa de Ozono, Acidificación, Eutrofización, Oxidación Fotoquímica y Agotamiento de Recursos Abióticos son más parecidos entre sí, siendo, en todos los casos, los valores de la S131 ligeramente superiores.

La diferencia de resultados se intensifica en las dos categorías restantes, donde el Agotamiento de Recursos Fósiles y Energéticos y la Toxicidad de la S131 superan en un 20 y 18%, respectivamente, a la S132.

Es decir, a grandes rasgos, parece que a excepción de la contribución al aumento del Calentamiento Global, la S132 presenta unos resultados mejores en la parte de la calzada. Si se considera la totalidad de la sección, incluyendo los dos arcenes, la S131 también genera unos impactos mayores en todas las categorías, a excepción de la de Calentamiento Global.

Por lo tanto, a pesar de que inicialmente el SC parecía una opción menos sostenible que la ZA, al considerar la totalidad de los espesores y capas de la calzada y arcenes, y cumpliendo con todas las especificaciones de la norma, se obtiene que la sección S132 con SC resulta una alternativa mejoren términos de sostenibilidad en todas las categorías analizadas menos en la de Calentamiento Global.

Tabla 23 Resultados de la fabricación y construcción de 1 m³ de ZA y SC. Fuente: Herramienta IECA.

TIPO DE MATERIAL	CATEGORÍA DE IMPACTO							
	Calent. Global [kg CO2eq]	Agot. de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO2eq]	Eutrofización [kg PO4 eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C2H2 eq]	Agot. Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [Kg eq 1,4 DB]
Zahorra artificial (ZA)	18,760	1,726E-06	0,150	0,030	4,441E-03	3,312E-05	509,790	14.457,360
Suelocemento (SC)	65,000	1,192E-05	0,137	0,029	1,856E-02	7,354E-05	701,190	17.339,110

Tabla 24 Resultados de la fabricación y construcción de las S131 y S132. Fuente: Herramienta IECA.

	ETAPA FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA	CATEGORÍA DE IMPACTO							
		Calent. Global [kg CO2eq]	Agot. de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO2eq]	Eutrofización [kg PO4 eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C2H2 eq]	Agot. Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [Kg eq 1,4 DB]
S131	Calzada	362.827,470	0,362	1.542,175	1.122,855	120,797	0,414	12.931.776,890	88.494.997,496
	Arcén Int. (1m)	29.073,147	0,027	107,672	87,607	9,833	0,030	1.023.954,113	4.954.893,590
	Arcén Ext. (2,5m)	66.726,664	0,063	247,070	201,053	22,560	0,069	2.348.618,821	11.381.562,766
	<b>TOTAL</b>	<b>458.627,281</b>	<b>0,452</b>	<b>1.896,917</b>	<b>1.411,515</b>	<b>153,190</b>	<b>0,513</b>	<b>16.304.349,824</b>	<b>104.831.453,852</b>
S132	Calzada	383.218,900	0,318	1.201,810	1.109,647	119,624	0,397	10.742.078,250	74.476.200,340
	Arcén Int. (1m)	28.144,369	0,024	90,063	82,664	8,908	0,029	788.444,956	5.286.025,331
	Arcén Ext. (2,5m)	64.636,911	0,056	207,451	189,932	20,477	0,068	1.818.723,219	12.126.609,180
	<b>TOTAL</b>	<b>476.000,180</b>	<b>0,398</b>	<b>1.499,324</b>	<b>1.382,243</b>	<b>149,009</b>	<b>0,494</b>	<b>13.349.246,425</b>	<b>91.888.834,851</b>

### 7.4.3. Comparación de todas las secciones analizadas

Finalmente, la última de las comparaciones relativa a la etapa de fabricación y puesta en obra, incluye la totalidad de las secciones. La *Tabla 25*, adjunta en la página siguiente, presenta los impactos asociados a la sección rígida (S134). Estos valores, siguiendo el mismo esquema que en los puntos anteriores, se dividen según la calzada y los dos arcenes.

A continuación, se presenta una tabla resumen (*Tabla 26*) donde se pueden comparar fácilmente las tres opciones analizadas. De estos resultados, se obtiene que la sección S134 genera prácticamente el doble de kg de CO<sub>2</sub> equivalente que las secciones con firme bituminoso (S131 y S132), por lo que, en la Categoría de Calentamiento Global, las diferencias son muy significativas. El valor obtenido en la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono (directamente proporcional a las emisiones de CFC) de la S134 también es ligeramente superior al de la S131, seguido de la S132.

En las categorías de Eutrofización y Acidificación también es la S134 la que lleva asociados unos impactos mayores, por lo que la afección a la flora y fauna del entorno se agudiza. En cuanto a la Oxidación Fotoquímica, la sección S134 genera un 23 y 25% menos de kg de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> equivalentes que las S132 y S131, respectivamente.

En los resultados del Agotamiento de Recursos Abióticos, es decir, los recursos “sin vida” que pueden ser explotados por el hombre, la sección S134 vuelve a ser la más peligrosa, seguida de la S131 y S132. No obstante, si lo que se analiza es el Agotamiento de los Recursos Fósiles y Energéticos, la cantidad de MJ necesaria para la construcción de 1 km de carretera con una sección S134 es prácticamente la mitad que la S131 y un 60% del valor de la S132. Por último, si se analiza la categoría de Toxicidad, los resultados son totalmente lo contrario, con la S134 generando más del doble de impacto que la S131 y casi 3 veces más que la S132.

En definitiva, resulta muy difícil escoger cuál de las tres secciones representa una mejor alternativa para el medioambiente. Dependiendo de la categoría que se considere que lleva asociada una mayor afección, la balanza se decanta hacia un lado u otro.

A pesar de ello, existen una serie de categorías que son más comúnmente conocidas y a las que se les suele dar más importancia. Dentro de este grupo, se considera que podrían incluirse el Calentamiento Global y el Agotamiento de la Capa de Ozono, por su relación directa con el fenómeno del Cambio Climático, además de la Acidificación, principal causante de la lluvia ácida. En este caso, la alternativa que lleva asociado un mayor riesgo para el entorno es la sección S134. Por el contrario, si se valora el hecho de que el betún, base para la fabricación de las mezclas bituminosas, es un recurso finito, parece una mejor opción las secciones fabricadas a partir de hormigones.

Si se desea poder conocer mejor el tipo de afección al ambiente que lleva asociada cada categoría, se puede consultar el *apartado 2.6 Categorías de impacto* donde se habla brevemente de ellas. Finalmente, se adjuntan más adelante las gráficas de los resultados de cada una de las categorías de impacto y para cada tipo de sección (*Figuras 103, 104, 105 y 106*). Adicionalmente, en el *Anejo 2. Caso práctico 2 – Inventario y resultados*, se incluyen los resultados de la etapa de construcción incorporando los datos relativos al transporte de los materiales a la planta de fabricación y a la obra.

Tabla 25 Resultados de la fabricación y construcción de la S134. Fuente: Herramienta IECA.

		CATEGORÍA DE IMPACTO							
ETAPA FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA		Calent. Global [kg CO2eq]	Agot. de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO2eq]	Eutrofización [kg PO4 eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C2H2 eq]	Agot. Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [Kg eq 1,4 DB]
S134	Calzada	711.374,000	0,378	2.309,563	2.159,973	93,544	0,466	6.274.773,220	205.324.134,685
	Arcén Int. (1m)	48.634,000	0,029	194,346	155,404	6,344	0,035	562.759,040	17.776.778,363
	Arcén Ext. (2,5m)	120.004,000	0,070	473,313	382,387	15,424	0,084	1.347.890,527	43.295.595,433
	<b>TOTAL</b>	<b>880.012,000</b>	<b>0,477</b>	<b>2.977,223</b>	<b>2.697,764</b>	<b>115,312</b>	<b>0,585</b>	<b>8.185.422,787</b>	<b>266.396.508,481</b>

Tabla 26 Resultados de la fabricación y construcción de las tres secciones Fuente: Herramienta IECA.

		CATEGORÍA DE IMPACTO							
ETAPA FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA		Calent. Global [kg CO2eq]	Agot. de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO2eq]	Eutrofización [kg PO4 eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C2H2 eq]	Agot. Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [Kg eq 1,4 DB]
S131		458.627,281	0,452	1.896,917	1.411,515	153,190	0,513	16.304.349,824	104.831.453,852
S132		476.000,180	0,398	1.499,324	1.382,243	149,009	0,494	13.349.246,425	91.888.834,851
S134		880.012,000	0,477	2.977,223	2.697,764	115,312	0,585	8.185.422,787	266.396.508,481



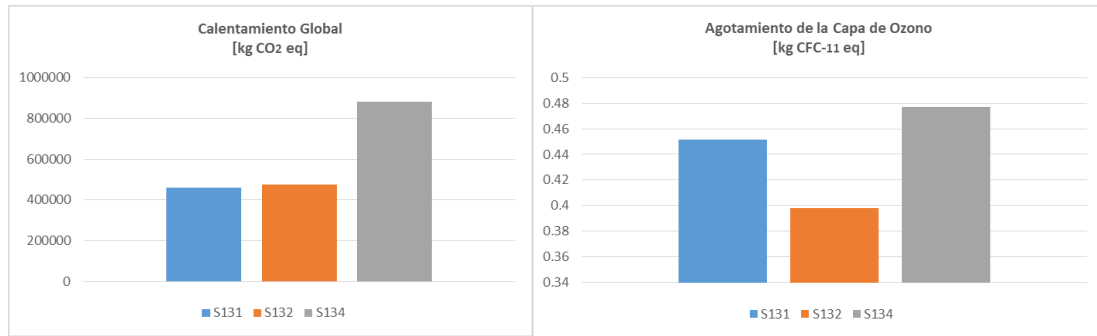


Figura 5 Resultados Calentamiento Global y Agotamiento de la Capa de Ozono (etapa construcción).  
Fuente: Herramienta IECA.

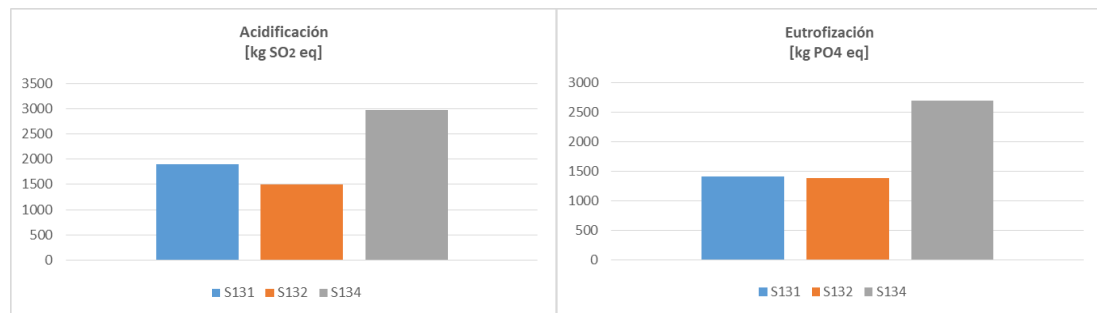


Figura 104 Resultados Acidificación y Eutrofización (etapa construcción).  
Fuente: Herramienta IECA.

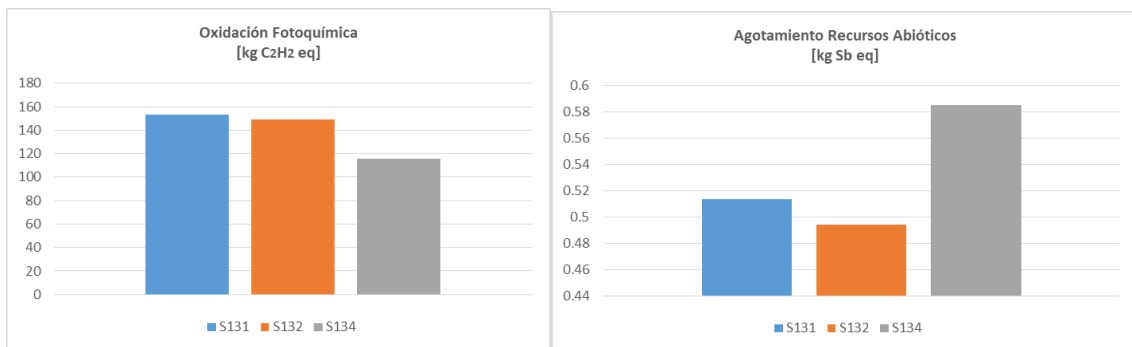


Figura 105 Resultados Oxidación Fotoquímica y Agotamiento Recursos Abióticos (etapa construcción).  
Fuente: Herramienta IECA.

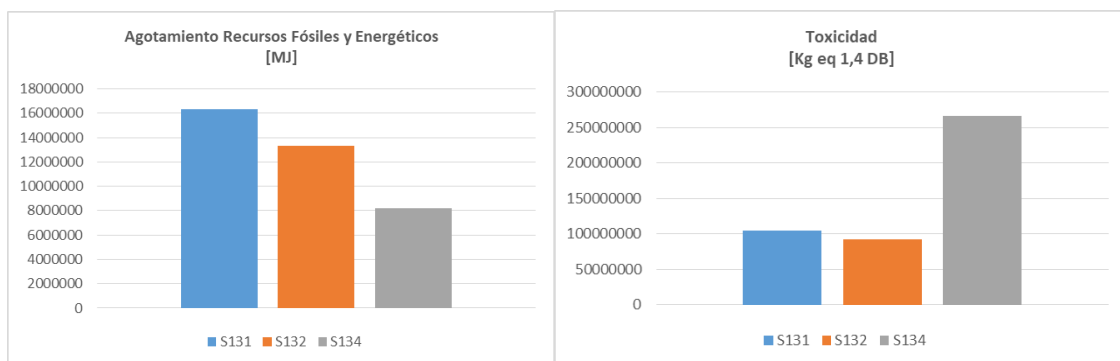


Figura 106 Resultados Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos y Toxicidad (etapa construcción).  
Fuente: Herramienta IECA.

#### 7.4.4. Comparación de las operaciones de mantenimiento

En la definición del inventario se establecen tres operaciones de mantenimiento a lo largo del periodo temporal de análisis, igual a 20 años (*ver punto 7.2.2. Datos de mantenimiento-conservación*). Los resultados asociados a éstas son los que se muestran en la primera tabla de la página siguiente (*Tabla 27*).

Como se puede comprobar, el refuerzo sobre la superficie de rodadura con una capa de mezcla bituminosa en caliente de 5 cm de espesor es la operación que lleva asociado un menor impacto en todas las categorías analizadas. Ésta es la única operación de tipo superficial definida, las otras dos restantes son de tipo estructural, por ello, la cantidad de material necesaria es bastante inferior y, por consiguiente, también son inferiores los impactos que se generan.

Dentro de las operaciones de tipo estructural, el recrecimiento de la S134 con una capa de 21 cm de hormigón en masa presenta unos resultados peores, en términos medioambientales, que el fresado y la reposición de las capas de rodadura e intermedia, aplicado en las secciones 131 y 132. La única categoría donde los impactos del fresado y la reposición superan al recrecimiento es en la de Agotamiento de Recursos Fósiles y Energéticos. Este resultado sigue la misma tendencia que los resultados de la etapa de construcción, donde las secciones fabricadas con materiales bituminosos presentaban peores resultados que los hormigones también en esta categoría. En el resto de categorías, el recrecimiento genera, aproximadamente, entre un 10 y un 25% más de impactos que el fresado y la reposición, a excepción de las categorías de Eutrofización y Calentamiento Global, donde las diferencias son del 33 y 70%, respectivamente

Si se comparan ahora, para cada una de las tres secciones, todas las etapas del CV analizadas (*Tabla 28*), se obtiene que los impactos asociados a la etapa de fabricación y construcción son, en todas las categorías, superiores a los de la etapa de mantenimiento y conservación. Esta última, en el caso de las secciones 131 y 132, corresponde a la suma de las operaciones que incluyen la capa de refuerzo de MBC y el fresado y la reposición.

Una vez más, analizando los resultados totales, se obtiene que la sección rígida (S134) es aquella que supone un mayor riesgo para el entorno, a excepción de las categorías de Oxidación Fotoquímica y Agotamiento de Recursos Fósiles y Energéticos.

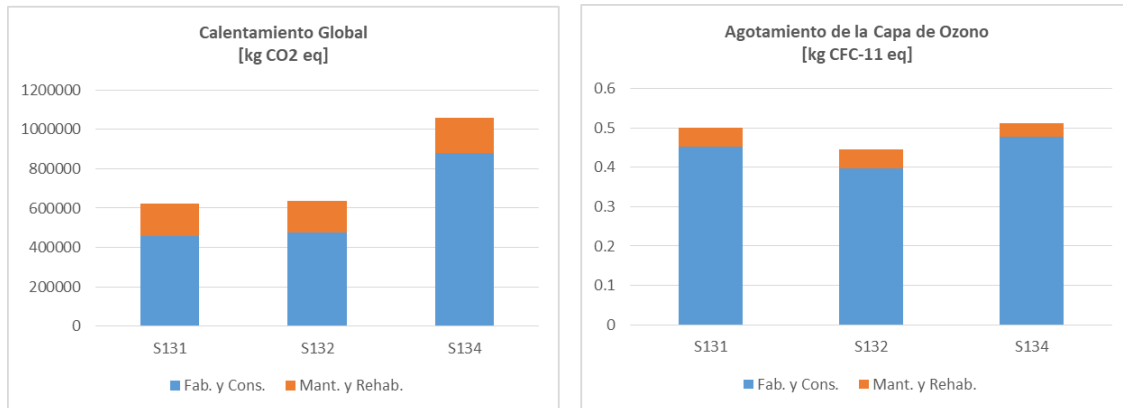
Tabla 27 Operaciones de mantenimiento superficial y estructural. Fuente: Herramienta IECA.

TIPO DE OPERACIÓN	CATEGORÍA DE IMPACTO							
	Calent. Global [kg CO <sub>2</sub> eq]	Agot. de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO <sub>2</sub> eq]	Eutrofización [kg PO <sub>4</sub> eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> eq]	Agot. Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [Kg eq 1,4 DB]
MBC 5cm	56.597,629	0,017	223.167	41,149	20,323	0,062	2.195.070,904	10.769.913,240
Fresado + Repos. MBC 9cm	105.633,757	0,031	411,808	76,237	37,615	0,115	3.997.086,160	19.881.543,210
Recrecimiento HM 21cm	178.924,874	0,036	458,936	100,828	47,572	0,141	1.693.846,910	22.509.756,500

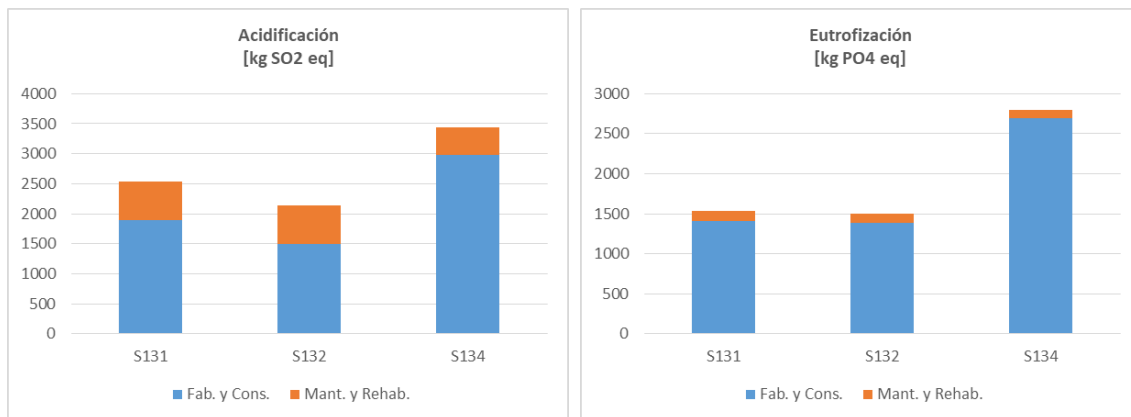
Tabla 28 Resultados etapas CV S131, S132 y S134. Fuente: Herramienta IECA.

	ETAPA DEL CV	CATEGORÍA DE IMPACTO							
		Calent. Global [kg CO <sub>2</sub> eq]	Agot. de la Capa de Ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificación [kg SO <sub>2</sub> eq]	Eutrofización [kg PO <sub>4</sub> eq]	Oxidación Fotoquímica [kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> eq]	Agot. Recursos Abióticos [kg Sb eq]	Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos [MJ]	Toxicidad [Kg eq 1,4 DB]
S131	Fab. y const.	458.627,281	0,452	1.896,917	1.411,515	153,190	0,513	16.304.349,824	104.831.453,852
	Mant. y rehab.	162.231,386	0,048	634,975	117,386	57,938	0,178	6.192.157,063	30.651.456,450
	<b>TOTAL</b>	<b>620.858,667</b>	<b>0,500</b>	<b>2.531,892</b>	<b>1.528.901</b>	<b>211,128</b>	<b>0,691</b>	<b>22.496.506,887</b>	<b>135.482.910,302</b>
S132	Fab. y const.	476.000,180	0,398	1.499,324	1.382,243	149,009	0,494	13.349.246,425	91.888.834,851
	Mant. y rehab.	162.231,386	0,048	634,975	117,386	57,938	0,178	6.192.157,063	30.651.456,450
	<b>TOTAL</b>	<b>638.231,560</b>	<b>0,446</b>	<b>2.134,299</b>	<b>1.499.629</b>	<b>206,947</b>	<b>0,672</b>	<b>19.541.403,488</b>	<b>122.540.291,301</b>
S134	Fab. y const.	880.012,000	0,477	2.977,223	2.697,764	115,312	0,585	8.185.422,787	266.396.508,481
	Mant. y rehab.	178.924,874	0,036	458,936	100,828	47,572	0,141	1.693.846,910	22.509.756,500
	<b>TOTAL</b>	<b>1.058.936,874</b>	<b>0,513</b>	<b>3.436,159</b>	<b>2.798,592</b>	<b>162,884</b>	<b>0,726</b>	<b>9.879.269,697</b>	<b>288.906.264,981</b>

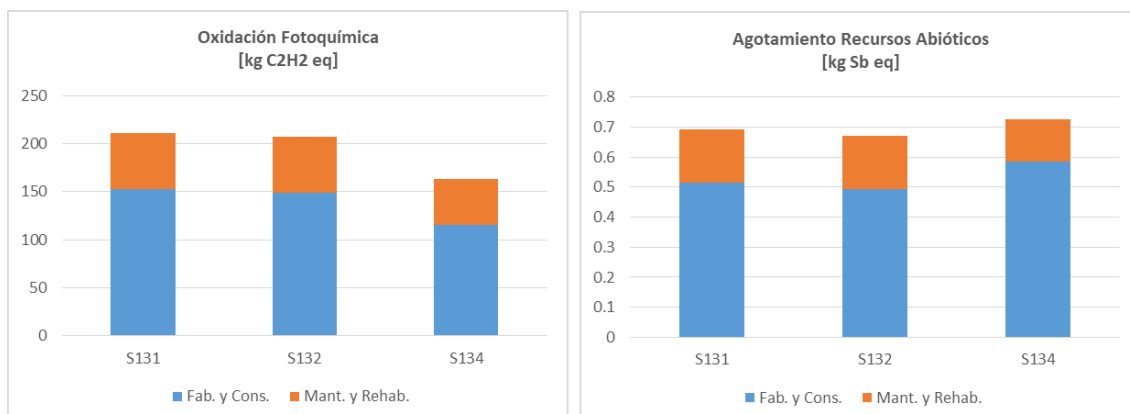
Además de los valores numéricos, se adjuntan los mismos resultados pero gráficamente (*Figuras 107, 108, 109 y 110*).



*Figura 107 Resultados Calentamiento Global y Agotamiento de la Capa de. Ozono para todas las etapas del CV.*  
Fuente: Herramienta IECA



*Figura 108 Resultados Acidificación y Eutrofización para todas las etapas del CV.*  
Fuente: Herramienta IECA.



*Figura 109 Resultados Oxidación Fotoquímica y Agotamiento Recursos Abióticos para todas las etapas del CV.*  
Fuente: Herramienta IECA.

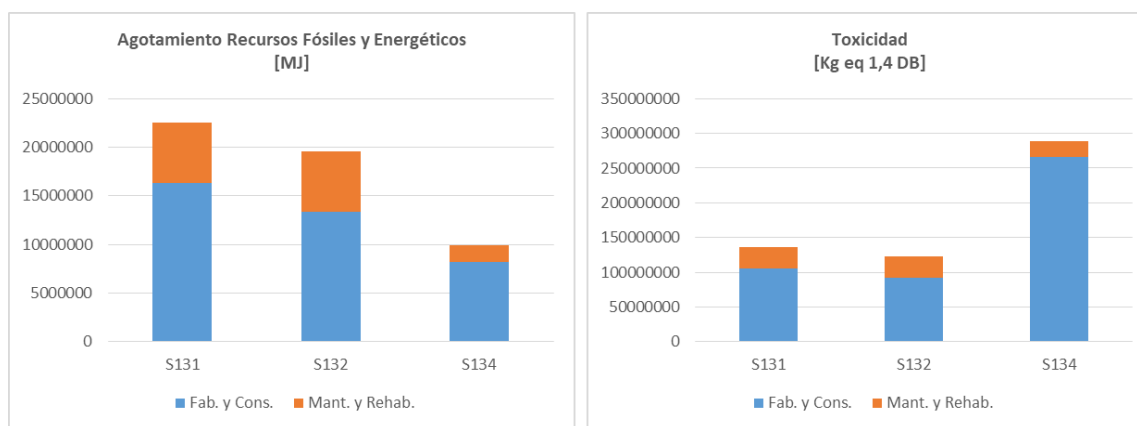


Figura 110 Resultados Agotamiento Recursos Fósiles y Energéticos y Toxicidad para todas las etapas del CV.

Fuente: Herramienta IECA.

Los resultados de la tabla y figuras anteriores (Tabla 28 y Figuras 107, 108, 109 y 110) corresponden a las operaciones que se han inventariado en la Fase 3 de este ACV, equivalentes a las del *Caso práctico 1*. No obstante, por defecto, esta herramienta del IECA considera una serie de actuaciones de conservación fijas y sus respectivos impactos. Los datos de éstas están disponibles para su consulta en el *Anejo 2. Caso práctico 2 – Inventario y resultados*, así como los impactos considerando la etapa de transporte de los materiales.

Como ya se ha dicho en numerosas ocasiones, los resultados de la etapa de mantenimiento y rehabilitación dependen mucho de las operaciones o estrategias definidas. Además, también supone un factor determinante el horizonte temporal de estudio. En este caso, al tratarse de un ejemplo académico simple, se han considerado únicamente 20 años, pero si se analizan periodos mucho más largos, los costes ambientales asociados al mantenimiento superan, en muchos casos, los de la construcción.

#### 7.4.5. Resultados del análisis de costes (CCV)

Una vez completado el análisis de los resultados del estudio ambiental, se procede a la valoración de los costes económicos del presente caso práctico. Como ya se ha comentado con anterioridad, los precios de cada una de las unidades de obra se obtienen a partir de la base de datos disponible en la herramienta.

En las tres tablas siguientes (Tablas 29, 30 y 31) se proporcionan los costes totales de cada una de las secciones y para una unidad funcional de 1.000 metros de longitud, dividiéndose en las diferentes etapas del CV evaluadas y según sean los costes asociados a la parte de la calzada o de los arcenes. Si se desea tener un grado de detalle más elevado, en el *Anejo 2. Caso práctico 2 – Inventario y resultados* se muestra, para la etapa de construcción, los costes asociados a cada una de las capas del firme, y para la etapa de mantenimiento, los costes de cada operación considerada. También se adjunta la base de datos con todos los precios relativos a materiales, maquinaria y mano de obra.

Tabla 29 Resultados costes asociados a la S131. Fuente: Herramienta IECA.

COSTES S131 [€]		
TOTAL	TOTAL CALZADA	TOTAL ARCENES
<b>639.623,79</b>	495.356,93	144.266,86
TOTAL CONSTRUCCIÓN	CONSTRUCCIÓN CALZADA	CONSTRUCCIÓN ARCENES
<b>369.056,53</b>	299.628,20	69.428,33
TOTAL MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO CALZADA	MANTENIMIENTO ARCENES
<b>231.681,73</b>	164.158,50	67.523,24
TOTAL CONSERVACIÓN	CONSERVACIÓN CALZADA	CONSERVACIÓN ARCENES
<b>38.885,52</b>	31.570,23	7.315,29

Tabla 30 Resultados costes asociados a la S132. Fuente: Herramienta IECA.

COSTES S132 [€]		
TOTAL	TOTAL CALZADA	TOTAL ARCENES
<b>562.228,87</b>	429.575,44	132.653,43
TOTAL CONSTRUCCIÓN	CONSTRUCCIÓN CALZADA	CONSTRUCCIÓN ARCENES
<b>299.038,98</b>	240.117,09	58.921,90
TOTAL MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO CALZADA	MANTENIMIENTO ARCENES
<b>231.681,73</b>	164.158,50	67.523,24
TOTAL CONSERVACIÓN	CONSERVACIÓN CALZADA	CONSERVACIÓN ARCENES
<b>31.508,15</b>	25.299,86	6.208,29

Tabla 31 Resultados costes asociados a la S134. Fuente: Herramienta IECA.

COSTES S134 [€]		
TOTAL	TOTAL CALZADA	TOTAL ARCENES
<b>455.639,75</b>	341.806,88	113.832,87
TOTAL CONSTRUCCIÓN	CONSTRUCCIÓN CALZADA	CONSTRUCCIÓN ARCENES
<b>318.829,54</b>	243.669,28	75.160,26
TOTAL MANTENIMIENTO	MANTENIMIENTO CALZADA	MANTENIMIENTO ARCENES
<b>103.216,83</b>	72.463,46	30.753,37
TOTAL CONSERVACIÓN	CONSERVACIÓN CALZADA	CONSERVACIÓN ARCENES
<b>33.593,38</b>	25.674,14	7.919,24

De los resultados finales, puede verse como la sección que resulta más viable económicamente es la fabricada con hormigón (S134). A ésta, le sigue la S132 con un 23% más de coste total y, por último, la más cara es la S131 con un incremento de hasta el 40% respecto a la primera.

Si para cada una de las secciones, se analizan los costes asociados a cada etapa, se observan diferentes aspectos. Por un lado, en todos los casos, los costes asociados a los arcnos siempre son menores que los de la calzada. Este resultado es lógico al ser la anchura de la calzada el doble que la de los arcnos y al estar formada por más capas de material.

Por otro lado, los costes asociados a la etapa de construcción son, en los tres casos, más elevados que en la etapa de mantenimiento. Sin embargo, las diferencias entre éstos varían en función de la sección analizada. En el caso de la sección 131, los costes de construcción son

aproximadamente un 60% mayores que los de mantenimiento. En la sección S132, esta diferencia es menos pronunciada, obteniéndose un valor del 30%. Finalmente, para la S134 se tiene que el coste de la construcción de la sección es 3 veces más que el coste de su mantenimiento.

Por último, del párrafo anterior, se observa como los costes de mantenimiento asociados a las secciones S131 y S132 son idénticos, resultado coherente puesto que las operaciones consideradas son las mismas. Además, se aprecia también que la sección que resulta más viable de mantener es la S134, en la que es necesario invertir menos de la mitad que en los otros dos casos.

Como siempre, para facilitar la comprensión de los resultados, se adjuntan las gráficas que muestra de un modo más sencillo todo lo comentado a lo largo de este apartado (*Figuras 111, 112 y 113*).

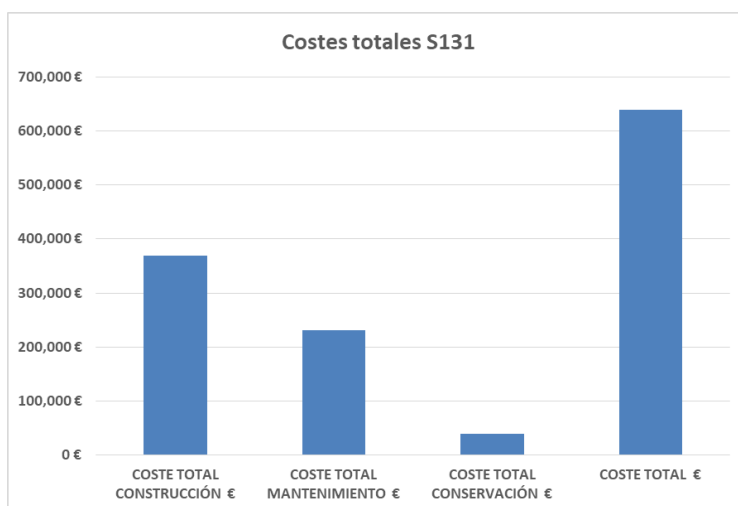


Figura 111 Resultados costes totales S131. Fuente: Herramienta IECA.

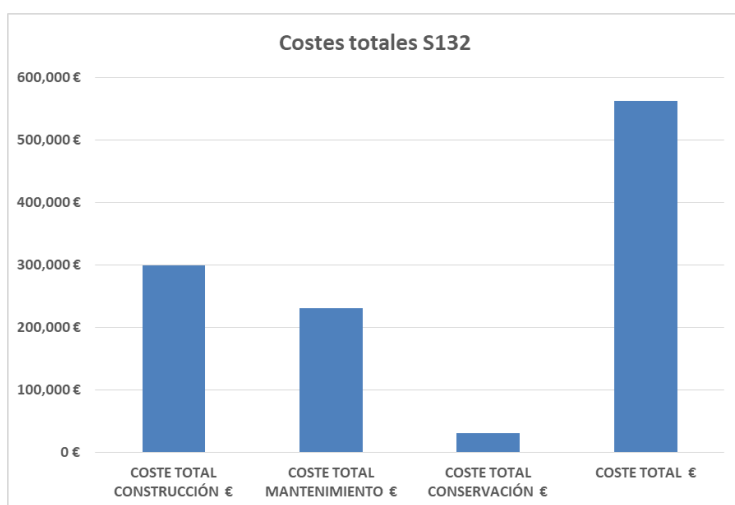


Figura 112 Resultados costes totales S132. Fuente: Herramienta IECA.

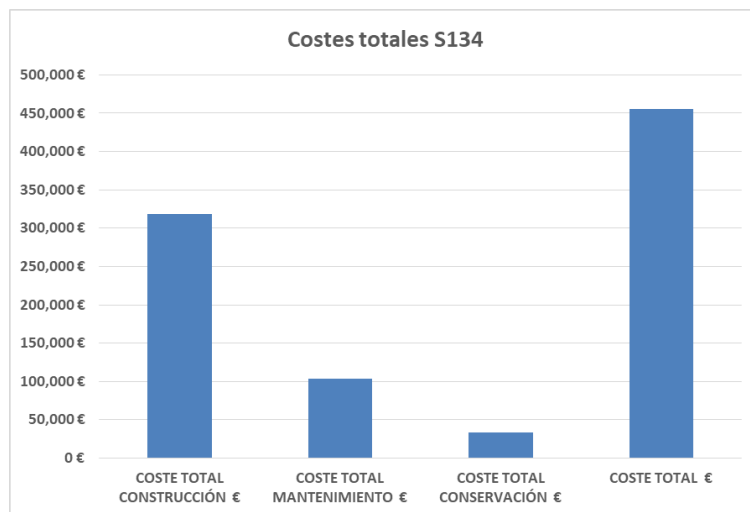


Figura 113 Resultados costes totales S134. Fuente: Herramienta IECA.



## Capítulo 8

### CONCLUSIONES

Del afán por mejorar la sostenibilidad del Planeta, nace la técnica de evaluación ambiental del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Una de sus aplicaciones, cuyo interés ha aumentado considerablemente en los últimos años, es en el sector de la carretera, particularmente, de los firmes.

El objetivo principal de este trabajo es conocer el estado actual del Análisis del Ciclo de Vida de Firmes (ACVF). Fundamentalmente, se quiere evaluar los principales estudios o metodologías realizados hasta el momento, además de las herramientas disponibles en el mercado para su ejecución.

Por este motivo, se escogen los proyectos europeos y españoles más relevantes. En todos ellos, se realiza una introducción general, se describe el plan de trabajo seguido durante el proyecto y, finalmente, se comentan los principales resultados obtenidos. De todos ellos, se extraen las siguientes conclusiones:

- En la mayoría de metodologías existentes, el ACV se centra únicamente en el firme, sin considerar la totalidad de la carretera, simplificando enormemente el número de variables del estudio.
- La definición de las unidades funcionales (UF) varía en función del proyecto considerado. Para aquellos estudios que no contemplan un horizonte temporal, la UF suele ser la tonelada de material (principalmente de mezcla bituminosa), sin embargo, los estudios realizados para un período de tiempo concreto (normalmente, entre 20 y 50 años), suelen utilizar como UF 1 m<sup>2</sup> de sección de firme.
- En relación con el punto anterior, tampoco existe una unificación en cuanto a las bases de datos utilizadas ni a las herramientas informáticas para la realización de los análisis.
- Las etapas del Ciclo de Vida (CV) consideradas, es decir, el alcance del sistema, son muy dispares entre sí. De las metodologías analizadas, únicamente *LCE4ROADS* incluye la totalidad del CV. Del resto, la mayoría se centra en estudios de la cuna a la puerta (*cradle to gate*) y otros, consideran también las etapas de mantenimiento y conservación. Los estudios cuyo objetivo es la evaluación del posible reciclaje de materiales, también incluyen la etapa de fin de vida.
- De los resultados se obtiene que, en las metodologías que valoran la fabricación y puesta en obra, la actividad que genera unos impactos mayores es la extracción de las materias primas.
- En los estudios en los que, adicionalmente, se incluyen las operaciones de mantenimiento, esta etapa puede llegar a afectar más al medioambiente que la propia

etapa de fabricación y construcción. Sin embargo, los resultados varían mucho en función de los años de estudio considerados y de las estrategias de mantenimiento definidas.

- Las metodologías que valoran el posible uso de materiales reciclados obtienen que éstos, en muchos casos, presentan una gran reducción de los impactos generados (especialmente, en la categoría de gases de efecto invernadero) y unas prestaciones muy similares a los materiales sin reciclar.

Tras conocer el estado del arte del ACVF, se analizan 6 herramientas informáticas, una de ellas de tipo genérico y el resto específicas para firmes. A partir de su examen, se pueden concluir los siguientes puntos:

- La única herramienta que contempla la totalidad de las etapas del CV es *GaBi*, de tipo genérico. Las restantes (*HueCO<sub>2</sub>*, *Eurobitume*, *ECCO<sub>2</sub>*, la del Gobierno de Aragón y la del IECA) consideran únicamente las etapas de producción de materiales y construcción del firme y, exclusivamente las dos últimas, incluyen su mantenimiento y conservación.
- Las herramientas específicas para ACVF son mucho más simples de utilizar, pensadas para que los técnicos puedan emplearlas sin grandes conocimientos de ACV, mientras que las genéricas exigen conocimientos mucho más avanzados. Además, las específicas incluyen gran cantidad de variables que hacen que los estudios de los firmes sean mucho más precisos, trabajando con datos del sector.
- Las herramientas que resultan de mayor interés para esta tesina son: la Herramienta del Gobierno de Aragón, por la gran cantidad de variables con las que trabaja y la posibilidad de comparación entre alternativas, y la Herramienta del IECA, por trabajar con las 8 categorías de impacto principales, la presentación de los resultados divididos por etapas y la opción de efectuar Análisis de Costes del Ciclo de Vida (CCV).
- No obstante, el *software ECCO<sub>2</sub>*, con apenas unas semanas de antigüedad, se prevé que sea una herramienta muy potente para el análisis sólo de mezclas bituminosas, principalmente, por la cantidad de variables con las que trabaja. Sin embargo, en la actualidad sólo dispone de la categoría relativa al indicador de cambio climático.

Finalmente, se realizan dos casos prácticos utilizando las dos herramientas anteriores seleccionadas. En ellos, se evalúa el impacto ambiental asociado a la fabricación, puesta en obra y mantenimiento de tres secciones de firme de la Norma 6.1-IC. Dos de ellas, fabricadas con mezclas bituminosas (S131 y S132) y otra con de tipo rígido, con hormigón (S134). Las conclusiones que se extraen del Caso práctico 1 (Herramienta del Gobierno de Aragón) son:

- La fabricación de 1 tonelada de mezcla bituminosa presenta unos impactos mayores en las categorías relacionadas con el agotamiento de recursos. Sin embargo, el hormigón resulta una alternativa menos sostenible si se evalúa la cantidad de emisiones generadas.
- La sección S131 (con zahorra artificial, ZA) obtiene unos resultados mucho mejores que la S132 (con suelocemento, SC). La única categoría donde la S131 es peor, es en MPnp, donde el consumo de materias primas no pétreas es un 15% mayor.

- La sección S134 lleva asociada una afección al entorno muy superior a las dos anteriores, especialmente en la categoría del Indicador del Cambio Climático (ICC) llegando a triplicar la cantidad de kg de CO<sub>2</sub> emitidos.
- Para las operaciones de mantenimiento definidas y el horizonte temporal de 20 años, el mantenimiento de la S131 genera unos impactos mayores a su construcción, mientras que en las otras secciones, la etapa de fabricación y puesta en obra es más impactante.

Del Caso práctico 2 se concluye que:

- Las mezclas bituminosas representan una alternativa mucho más sostenible que los hormigones generando menores impactos en 7 de las 8 categorías analizadas.
- Exceptuando la categoría de Calentamiento Global, la sección S131 genera unos impactos superiores a la S132. Los espesores de las capas de la primera son mayores, por lo que se concluye que existe una relación directa entre el volumen de material y el impacto asociado a éste.
- Comparando las tres secciones, la S134 resulta, por lo general, menos sostenible que las otras dos, generando hasta el doble de kg de CO<sub>2</sub> equivalente. Donde las secciones bituminosas resultan más peligrosas es en las categorías relacionadas con el Agotamiento de los Recursos Fósiles, al ser el petróleo un recurso no renovable.
- Con la estrategia definida, la etapa de mantenimiento presenta unos impactos menores que la fabricación y construcción en las tres secciones. Además, a excepción de la contribución al cambio climático, la sección rígida (S134) resulta más sostenible de mantener.
- Del análisis de costes se concluye que la sección más viable económicamente es la fabricada con hormigón (S134), seguida de la de ZA (S131) y, en último lugar, la de SC (S132).

En definitiva, de todos los puntos anteriores se concluye que el ACV es una herramienta muy potente para la evaluación ambiental y se aprecia la gran cantidad de trabajos y herramientas disponibles para llevarlo a cabo. A pesar de ello, destaca la inconsistencia entre las unidades funcionales y etapas del CV consideradas, así como las bases de datos empleadas, haciendo que los valores de los impactos obtenidos lleven asociados una indiscutible carga de subjetividad. Por lo tanto, los resultados que se obtienen en los casos prácticos no pueden tomarse como verdades absolutas, siendo válidos para las presentes hipótesis consideradas y tampoco pudiendo compararse directamente entre sí.

## REFERENCIAS

### Referencias bibliográficas

- Antón, M.A., 2004. *Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Capítulo 3 – Metodología del Análisis del Ciclo de Vida*. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Projectes d'Enginyeria. Tesis doctoral. España.
- Basañez, A., Martínez, I. Insunza, G. y Conzález, X., 2013. *El Análisis del Ciclo de Vida en España. Temas de Investigación Principales y Agentes Clave*. Book of Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management – XVII Congreso de Ingeniería de Organización. España.
- Björn Karlmar et al., 2013. *Re-Road – Summary Report*. European Comission DG Research. Disponible en: <http://re-road.fehrl.org/index.php?m=64>
- COM, 2001. *Libro verde sobre la política de los productos integrada*. Comisión de las Comunidades Europeas. Bruselas, Bélgica.
- Cowell, S.J., 1998. *Environmental Life Cycle Assessment of Agricultural Systems: Integration Into Decision-Making*. Centre for Environmental Strategy. University of Surrey. Tesis doctoral. Guildford, Reino Unido.
- Doménech, X. and Fullana, P., 1996. LCA association in Spain. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1(4):207.
- ECRPD, 2010. *Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation*. Publishable report. Intelligent Energy Europe. February, 2010. Disponible en: [https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/ecrpd\\_publishable\\_report\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/ecrpd_publishable_report_en.pdf)
- Felipo, J., Irusta, R., Núñez, Y., García, N., García, C., Buisson, J., Peinado, D. y Potti, J., 2008. *Análisis del ciclo de vida de las técnicas constructivas de pavimentos para carreteras*. VIII Congreso Nacional de Firmes. Vol. 1, p. 403-411. Valladolid, España.
- Fernández, R., Martin-Portugues, C. y Guedella, E., 2016. *Life cycle engineering for roads (LCE4ROADS), the new sustainability certification system for roads from the LCE4ROADS FP7 project*. *Transportation Research Procedia* 14, 896-905 (2016).
- Fullana, P. y Puig, R., 1997. *Análisis de Ciclo de Vida*. Cuadernos de Medio Ambiente. Rubes Editorial S.L.. Barcelona, España.
- Harvey, J., Meijer, J. and Kendall, A., 2014. *Life Cycle Assessment of Pavements*. University of California, Davis. Federal Highway Administration (FHWA). U.S. Department of Transportation. Disponible en: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement>
- Haya, E., 2016. *Análisis de Ciclo de Vida*. Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental (Madrid). Fundación EOI Escuela de Organización Industrial. Disponible en: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/25482/analisis-de-ciclo-de-vida>
- Hunkeler, D., Lichtenvort, K., and Rebitzer, G., 2008. *Environmental Life Cycle Costing*. CRC Press.

- Hunt, Robert G.; Franklin, William E.; Hunt, R. G., 1996 *LCA – How it came about*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1996, vol. 1, no 1, p. 4-7.
- IHOBE, 2009. *Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto*. Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca. Gobierno Vasco. España.
- Layman's Report, 2018. *Life sure. Self-sustaining urban road: A way to improve environmental performance of urban áreas*. Layman's Report LIFE12/ENV/ES/000072. Disponible en: <http://www.lifesure.es/documentacion/Laymann%20Report/Laymann%20Report.pdf>
- Moral, A., Couceiro, M. y Sampedro, A., 2015. *El análisis del ciclo de vida como herramienta de evaluación ambiental en las secciones de firme*. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen XIII, 2015. España.
- Moral, A., 2016. *La herramienta ambiental análisis del ciclo de vida en el estudio de secciones de firme. Evaluación ambiental de varias secciones de firme de categoría de tráfico T00 a T2 conforme a la norma 6.1-IC*. Universidad Alfonso X El Sabio. Escuela Politécnica Superior. Programa de Doctorado Medio Ambiente y Territorio. España.
- Ortiz, J., Crisén, X. y Sorribas, E., 2019. *Impactos ambientales de las mezclas bituminosas según el modelo ECCO<sub>2</sub>*. Mayo, 2019. Disponible en: <http://www.asefma.es/wp-content/uploads/2019/05/18-COMUNICACION%CC%81N-2-ECCO2.pdf>
- Paris, A. y Moncunill, C., 2007. *Mezclas bituminosas en caliente y análisis de ciclo de vida*. Revista Carreteras. Nº 155. Sept-Oct. 2007. España
- Paris, A., Moncunill, C. y Ortiz, J., 2006. *Análisis de ciclo de vida en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente*. Revista Carreteras. Nº 150: 108-123. 2006. España
- Perelli, M. y Parra, L., 2018. *Análisis ambiental y de costes en el ciclo de vida de firmes y pavimentos*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Ministerio de Fomento. España.
- Sala S., Benini L., Crenna E. y Secchi M., 2016. *Global environmental impacts and planetary boundaries in LCA. Data sources and methodological choices for the calculation of global and consumption-based normalisation factors*. JRC Technical Reports. European Commission. Luxemburgo.
- Sampedro, A., 2011. *Desarrollo de una metodología de análisis de ciclo de vida integral específica para carreteras*. Cuaderno Tecnológico de la PTC. Plataforma Tecnológica Española de la Carretera. Madrid, España.
- Sampedro, A., 2016. *Análisis de Ciclo de Vida de empleo de Altas Tasas de reciclado en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente*. Universidad Alfonso X El Sabio. Escuela Politécnica Superior. Tesis doctoral. España.
- Sampedro, A., del Val, M.A. y Buisson, J., 2009. *Aplicación del Análisis de ciclo de vida (ACV) para la valoración de la sostenibilidad del reciclado de mezclas asfálticas en caliente*. Disponible en: <http://www.proyectoefenix.eu/>
- Sampedro, A., del Val, M.A., Gallego, J., Querol, N. y del Pozo, J., 2012. *Huella de carbono del reciclado en planta asfáltica en caliente con altas tasas de RAP*. Revista Asfaltos y Pavimentos. Edición Nº 25. Julio – Diciembre de 2012. Bucaramanga, Colombia.
- Udo de Haes, H.A., Jolliet, O., Finnveden, G., Hauschild, M., Krewit, W., Müller-Wenk, R. (1999b). *Best Available Practice Regarding Impact Categories and Category Indicators in Life Cycle Impact Assessment (II)*. The International Journal of Life Cycle Assessment. 4(2): 66-74.

## Normativa consultada

*ISO/TR 14047: 2012 Gestión ambiental. Evaluación del impacto del ciclo de vida. Ejemplos de la aplicación de la norma ISO 14044.*

*ISO/TR 14049: 2012 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Ejemplos de aplicación de la ISO 14044 para la definición del objetivo, el alcance y para el análisis de inventario.*

*ISO/TS 14048: 2002 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Formato de la documentación de datos.*

*ISO/TS 14071: 2014 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Procesos de revisión crítica y competencias de los auditores.*

*ISO/TS 14072: 2014 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices para la Evaluación del ciclo de vida organizacional.*

*Norma 6.1-IC: 2003. Secciones de firmas.*

*Orden Circular 9/2002 Rehabilitación de firmes. Instrucciones de construcción.*

*UNE-EN 15804: 2012+A1:2014 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.*

*UNE-EN ISO 14040: 2006 Gestión ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia.*

*UNE-EN ISO 14044: 2006 Gestión ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices.*

## Otra bibliografía consultada

Análisis de Ciclo de Vida (ACV): Metodología y aplicación práctica (Principios generales). (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<https://es.slideshare.net/lhobe/anlisis-de-ciclo-de-vida-acv-metodologa-y-aplicacin-prctica-metodologa-y-aplicacin-prctica>

CORDIS (Comisión Europea), resultados de los programas marco de Investigación e Innovación de la UE. Información del proyecto LCE4ROADS (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<https://cordis.europa.eu/project/rcn/110518/factsheet/es>

ECCO<sub>2</sub> (Última consulta: Junio 2019). Disponible en:

<http://www.arno.es/es/ecco2/>

Ecointeligencia (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<https://www.ecointeligencia.com/2016/05/acv-marco-normativo/>

EcoInvent (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<https://www.ecoinvent.org/database/database.html>

EPLCA *European Platform on Life Cycle Assessment* (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/aboutUs.html>

Eurobitume. Life Cycle Inventory (LCI): Bitumen (Última consulta: Abril 2019). Disponible en:

<https://www.eurobitume.eu/nc/publications/documents/?keyword=LCI>

GaBi Software (Última consulta: Abril 2019). Disponible en:

<http://www.qabi-software.com/>

Gestiopolis (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<https://www.gestiopolis.com/historia-analisis-del-ciclo-vida-producto-acv/>

Gobierno de Aragón, herramienta de evaluación ambiental (Última consulta: Abril 2019). Disponible en:

[http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Departamentos/VertebracionTerritorioMovilidadVivienda/AreasTematicas/ci.03\\_Carreteras.detalleConsejo?channelSelected=0#section10](http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Departamentos/VertebracionTerritorioMovilidadVivienda/AreasTematicas/ci.03_Carreteras.detalleConsejo?channelSelected=0#section10)

HueCO<sub>2</sub> (Última consulta: Abril de 2019). Disponible en:

<http://hueco2.tecniberia.es/>

IECA (Última consulta: Abril de 2019). Disponible en:

<https://www.ieca.es/categoria-producto/programas-informaticos/>

LCE4ROADS (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<http://www.lce4roads.eu/>

LIFESURE (Última consulta: Abril 2019). Disponible en:

<http://www.lifesure.es/index.php/es/>

Observatorio del Transporte y la Logística en España, Informe anual 2017 (Última consulta: Junio 2019). Disponible en:

<http://observatoriotransporte.fomento.es/NR/rdonlyres/EE4D9E3E-74A9-4C1F-A5FC-284D30BBAFFA/148831/INFORMEOTLE2017.pdf>

PDCA Home (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<https://www.pdcahome.com/ccv/>

Proyecto Fénix (Última consulta: Abril 2019). Disponible en:

<http://www.proyectofenix.eu/>

Re-Road (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<http://re-road.fehrl.org/index.php?m=1>

SETAC *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<https://www.setac.org>

ISO *International Organization for Standardization* (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<https://www.iso.org/ics/13.020.10/x/>

SGS - Información Técnica: Análisis de Ciclo de Vida (ACV) – Aspectos clave y limitaciones (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<https://www.sgs.es/es-es/news/2012/06/informacion-tecnica-analisis-de-ciclo-de-vida-acv>

U.S. LCI (Última consulta: Marzo 2019). Disponible en:

<https://www.nrel.gov/lci/>